

**AISI 8640 VE GS 60 ÇELİK MALZEMELERİN
ABRASİF AŞINMA VE KOROZYON DAVRANIŞINA
BORLAMA İŞLEMİNİN ETKİSİ**

**2013
YÜKSEK LİSANS TEZİ
METAL EĞİTİMİ**

Çağdaş DEMİREL

**AISI 8640 VE GS 60 ÇELİK MALZEMELERİN ABRASİF AŞINMA VE
KOROZYON DAVRANIŞINA BORLAMA İŞLEMİNİN ETKİSİ**

Çağdaş DEMİREL

**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metal Eğitimi Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Haziran 2013**

Çağdaş DEMİREL tarafından hazırlanan " AISI 8640 VE GS 60 ÇELİK MALZEMELERİN ABRASİF AŞINMA VE KOROZYON DAVRANIŞINA BORLAMA İŞLEMİNİN ETKİSİ." başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarız.

Doç. Dr. Melik ÇETİN

Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metal Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir. 28/ 06/ 2013

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Ferhat GÜL (GÜ)

Üye : Prof. Dr. Mustafa BOZ (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Melik ÇETİN (KBÜ)



...../...../2013

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Çağdaş DEMİREL

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AISI 8640 VE GS 60 ÇELİK MALZEMELERİN ABRASİF AŞINMA VE KOROZYON DAVRANIŞINA BORLAMA İŞLEMİNİN ETKİSİ

Çağdaş DEMİREL

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metal Eğitimi Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Melik ÇETİN

Haziran 2013, 117 sayfa

Bu çalışmada, AISI 8640 ve GS 60 çeliğinin abrasif aşınma ve korozyon davranışına borlama işleminin etkisi araştırılmıştır. Borlama işlemi Ekobor-2 içerisinde 850 °C, 900 °C ve 950 °C sıcaklıklarda 2, 4, 6 ve 8 saat uygulanmıştır. Abrasif aşınma testleri, iki gövdeli pin-on-disk türü aşınma cihazında, 10 N ve 20 N yükler altında, 10 m kayma mesafede ve 0,1 ms⁻¹ kayma hızında, 1000 ve 1200 mesh zımpara kullanarak gerçekleştirilmiştir. Borlanmış numunelerin mikroyapısı, mikro sertliği, bor tabakası kalınlığı, korozyonu ve aşınma yüzeyleri incelenmiştir. Abrasif Aşınma testlerinden, 950 °C'de 8 saat borlanan numunelerin, tüm deney şartlarında en düşük aşınma kaybına sahip olduğu tespit edilmiştir. Borlama süresinin arttırılmasıyla daha kalın katman oluştuğu görülmüştür. Mikro sertlik ölçüm ve korozyon sonuçlarına göre de borlama sıcaklığı ve süresinin artmasıyla sertlik değerlerinin ve korozyon dayanımlarının arttığı tespit edilmiştir. Çelik malzemelerin üzerinde oluşan

borürlerin düzgün dallı bir morfolojiye sahip olduğu SEM ve optik incelemeler sonucu görölmüştür. Her bir çeliğın yüzeyindeki FeB ve Fe₂B borürler X-ışını kırınım analizi ile tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler : AISI 8640 ve GS 60 çeliğı, borlama, abrasif aşınma, korozyon.

Bilim Kodu : 710.1.196

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

ABRASIVE WEAR AND CORROSION BEHAVIOR OF AISI 8640 AND GS 60 STEEL MATERIALS OF THE EFFECT OF TREATMENT ON BORONIZING

Çağdaş DEMİREL

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Metalurgy Education

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Melik ÇETİN

June 2013, 117 pages

In this study, the abrasive wear and corrosion behaviour of previously boronized AISI 8640 and GS60 steels were determined. The boronizing treatments were performed in Ekobor-2 at temperatures of 850 °C, 900 °C and 950 °C, during 2, 4,6 and 8 h. Abrasive wear tests were performed on the pin on disc apparatus under the normal loads of 10 and 20 N, 10 m sliding distance and the sliding speed of 0.1 m s⁻¹ by rubbing the specimens to abrasive Al₂O₃ grains with 1000 and 1200 mesh. Microstructure, micro hardness, boride layer thickness, corrosion and worn surface of the borided specimens were examined. Abrasive wear tests revealed that, for all experiment conditions, specimens boronized at 950 °C for 8 h determined to have the lowest wear lose. Thicker layers were formed by increasing the duration of boronizing. Micro-hardness and corrosion values according to the results of hardness and corrosion resistance of the increase in boriding temperature and time were

increased. The boride formation on the steel substrate was observed to have a uniform dendritic morphology after SEM and optical analyse. On the surface of each steel, the boride formation of FeB and Fe₂B were obtained, which were revealed by XRD analyse.

Key Word : AISI 8640 and GS 60 steel, boronizing, abrasive wear, corrosion.

Science Code : 710.1.196

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Doç. Dr. Melik ÇETİN başta olmak üzere bütün hocalarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalar sırasında yardımlarını esirgemeyen, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi öğretim üyesi, çok kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Ferhat GÜL'e ve Yrd. Doç. Dr. Hasan HASIRCI'ya çok değerli arkadaşlarım Ersin ÖLMEZ, Bünyamin ÇİÇEK ve Gamze TOPRAK'a teşekkürü bir borç bilirim.

Deney numuneleri temininde benden yardımlarını esirgemeyen Altan makine ve çelik döküm firması yetkilerine teşekkür ederim.

Hayatımın her safhasında benle birlikte olan ve benden maddi, manevi desteklerini hiç esirgemeyen ve en büyük fedakârlıkta bulunan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xix
BÖLÜM 1.	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	3
BOR ve BORLAMA.....	3
2.1. BOR.....	3
2.1.1. Ticari Bor Mineralleri.....	4
2.1.2. Borun Tarihçesi	5
2.1.3. Bor Ürünlerinin Başlıca Kullanım Alanları.....	6
2.2. BORLAMA	7
2.2.1. Demir Bor Denge Diyagramı	8
2.2.2. Borlama İşlemi ve Reaksiyon Mekanizması	10
2.2.2.1. Katı Ortamda Borlama	11
2.2.2.2. Gaz Ortamda Borlama	12
2.2.2.3. Sıvı Ortamda Borlama	12
2.2.3. Demir Borürlerin Büyüme Mekanizması	13
2.2.4. Bor Tabakasının Türleri.....	14
2.2.5. Bor Tabakasının Kalınlığının Belirlenmesi	15
2.2.6. Borür Tabakasının Özellikleri	15

	<u>Sayfa</u>
2.2.6.1. Sertlik.....	15
2.2.6.2. Aşınma Dayanımı	15
2.2.6.3. Korozyon Dayanımı.....	16
2.2.6.4. Kalıntı Gerilmeler	16
2.2.7. Borlama İşleminin Avantajları Dezavantajları	17
2.2.8. Borlama İşleminin Endüstriyel Kullanım Alanları	19
BÖLÜM 3.	21
AŞINMA	21
3.1. AŞINMANIN TEMEL UNSURLARI.....	22
3.1.1. Aşınmayı Etkileyen Faktörler.....	23
3.1.1.1. Ana Malzemeye Bağlı Faktörler	23
3.1.1.2. Karşı Malzemeye Bağlı Faktörler Ve Aşındırıcının Etkisi.....	23
3.2. TRİBOLOJİK SİSTEM.....	23
3.3. AŞINMA TEST MODELLERİ.....	26
3.4. AŞINMA VEYA YÜZEY DEFORMASYONU	28
3.5. AŞINMA ÇEŞİTLERİ	29
3.5.1. Adhesif Aşınma Mekanizması (Yapışma Aşınması).....	30
3.5.2. Abrasif Aşınma Mekanizması	32
3.5.3. Yorulma Aşınması	35
3.5.4. Eroziv Aşınma.....	36
3.5.5. Öğütmeli Aşınma (Grinding Wear).....	36
3.5.6. Oymalı Aşınma (Gouging Wear)	37
3.5.7. Kazımalı Aşınma (Fretting Wear)	37
3.5.8. Tribosüblimasyon Ve Difüzyon Aşınması	38
3.5.9. Termal Aşınma (Termal Etkenler)	39
3.6. AŞINMAYA ETKİ EDEN FAKTÖRLER	40
3.6. 1. Tribolojik Sistemlerin Elemanlarına Bağlı Faktörler	40
BÖLÜM 4.	42
AISI 8640 ve GS 60 ÇELİKLERİ	42
4.1. AISI 8640 ÇELİĞİ	42

	<u>Sayfa</u>
4.2. GS 60 ÇELİKLERİ	44
4.2.1. Dökme Çelikler.....	45
4.2.1.1.Dökme Çeliklerin Tanıtılması	45
4.2.1.2. Dökme Çeliğin Çeşitleri ve Kimyasal Bileşimi	46
BÖLÜM 5.	48
KOROZYON	48
5.1. KOROZYON NEDİR?.....	48
5.1.1. Kimyasal Korozyon.....	48
5.1.2. Elektrokimyasal Korozyon	48
5.2. KOROZYON ÇEŞİTLERİ.....	51
5.2.1. Çukur Korozyonu	51
5.2.2. Galvanik Korozyon.....	52
5.2.3. Çatlak (Aralık) Korozyonu	52
5.2.4. Kabuk Altı Korozyonu	53
5.2.5. Fili Form Korozyonu	53
5.2.6. Seçimli Korozyonu	54
5.2.7. Taneler Arası Korozyon	54
5.2.8. Gerilmeli Korozyon.....	55
5.2.9. Yorulmalı Korozyonu.....	55
5.2.10.Erozyonlu Korozyon.....	56
5.3. KOROZYON HIZININ ÖLÇÜMÜ	56
5.3.1. Kütle Azalması Yöntemi	57
5.3.2. Lineer Polarizasyon Yöntemi	57
5.3.3. Alternatif Akım Empedans Ölçme Yöntemi	58
5.3.4. Tafel Elektro-Polarizasyon Yöntemi	58
BÖLÜM 6.	62
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	62
6.1. MALZEME VE ÖZELLİKLERİ.....	62
6.2. METALOGRAFİK İNCELEMELER.....	63
6.3. MİKRO SERTLİK ÖLÇÜMLERİ	64

	<u>Sayfa</u>
6.4. KOROZYON DENEYİ	64
6.5. AŞINMA DENEYİ	66
6.6. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ	67
6.7. X-IŞINLARI KIRINIM ANALİZİ İNCELEMELERİ	68
BÖLÜM 7.	69
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	69
7.1. MİKROYAPI ÇALIŞMALARI	69
7.2. MİKRO SERTLİK ÖLÇÜMLERİ.....	75
7.3. KOROZYON DENEYİ SONUÇLARI.....	80
7.4. AŞINMA DENEYİ SONUÇLARI	88
7.5. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ	103
7.6. X-IŞINLARI KIRINIM ANALİZİ SONUÇLARI.....	105
BÖLÜM 8.	108
SONUÇLAR	108
KAYNAKLAR	111
ÖZGEÇMİŞ	117

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Demir-Bor denge diyagramı	9
Şekil 2.2. Fe ₂ B kristalinin birim kafesi	10
Şekil 2.3. Borür tabakasında FeB ve hemen altında yer alan Fe ₂ B bölgesinin büyüme mekanizması	14
Şekil 2.4. Borür tabakasının türleri	14
Şekil 2.5. Borür tabaka kalınlığının belirlenmesi.....	15
Şekil 3.1. Tribolojik sisteme giren enerji dağılımı.....	25
Şekil 3.2. Bir tribolojik sistemin şematik gösterimi.....	25
Şekil 3.3. Şematik kayma sürtünmesi ve aşınma test modelleri	26
Şekil 3.4. Şematik abrasif aşınma test modelleri	27
Şekil 3.5. Yüzey aşınma ve bozulmalarının sınıflandırılması.....	28
Şekil 3.6. Adhesif aşınmanın meydana gelişinin şematik olarak gösterimi.....	32
Şekil 3.7. Abrasif aşınma şeması	33
Şekil 3.8. İki elamanlı abrasif aşınma	34
Şekil 3.9. Üç elamanlı abrasif aşınma	34
Şekil 3.10. Yorulma aşınması şeması	36
Şekil 3.11. Bir kesici uçta meydana gelen kendi kendine bilenmesinin oluşum mekanizması.....	37
Şekil 3.12. Yüzeyler arası malzeme transferi.....	39
Şekil 4.1. AISI 840 çeliğinin menevişi	44
Şekil 5.1. HCl ortamında metalin korozyonu sırasında gerçekleşen elektrokimyasal olaylar	50
Şekil 5.2. Çukur korozyon işleyiş şeması	52
Şekil 5.3. Galvanik korozyonun şematik gösterimi	52
Şekil 5.4. Aralık korozyonunun şematik gösterimi.....	53
Şekil 5.5. Fili form korozyonun şematik gösterimi.....	54
Şekil 5.6. Seçimli korozyonun şematik gösterimi.....	54
Şekil 5.7. Taneler arası korozyonun meydana geldiği bölge	55

	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.8. Gerilmeli korozyonun şematik gösterimi.....	55
Şekil 5.9. Yorulmalı korozyonun şematik gösterimi.....	56
Şekil 5.10. Erozyonlu korozyonun şematik gösterimi.....	56
Şekil 5.11. Lineer polarizasyon yöntemi ile Rp bulunması.....	57
Şekil 5.12. Anodik ve katodik polarizasyon eğrileri.....	60
Şekil 6.1. Numune kutusunun hazırlanması.....	63
Şekil 6.2. Potansiyostatik yöntemle çalışan statik korozyon deney düzeneği.....	65
Şekil 6.3. Statik korozyon deney hücresi.....	66
Şekil 6.4. Aşınma deney cihazının şematik gösterimi.....	67
Şekil 6.5. Mitutoyo SJ201 marka profilemetre cihazı.....	67
Şekil 7.1. Dökümden sonra hiçbir işlem görmemiş 8640 çelik malzemesine ve GS 60 çelik malzemesine ait mikroyapılar.....	69
Şekil 7.2. 850°C’de borlanan 8640 çelik numunelere ait mikroyapılar.....	70
Şekil 7.3. 900°C’de borlanan 8640 çelik numunelere ait mikroyapılar.....	71
Şekil 7.4. 950°C’de borlanan 8640 çelik numunelere ait mikroyapılar.....	71
Şekil 7.5. 8640 çeliğinde 850 °C, 900 °C ve 950 °C’de borlama süresine bağlı olarak bor tabaka kalınlığının değişimi.....	72
Şekil 7.6. 850°C’de borlanan GS 60 çelik numunelere ait mikroyapılar.....	73
Şekil 7.7. 900°C’de borlanan GS 60 çelik numunelere ait mikroyapılar.....	73
Şekil 7.8. 950°C’de borlanan GS 60 çelik numunelere ait mikroyapılar.....	74
Şekil 7.9. GS 60 çeliğinde 850°C 900°C ve 950°C’de borlama süresine bağlı olarak bor tabaka kalınlığının değişimi.....	74
Şekil 7.10. 850°C’de borlanan 8640 çelik numunelerin yüzey altından alınan mikro sertlik değerleri.....	76
Şekil 7.11. 900°C’de borlanan 8640 çelik numunelerin yüzey altından alınan mikro sertlik değerleri.....	76
Şekil 7.12. 950°C’de borlanan 8640 çelik numunelerin yüzey altından alınan mikro sertlik değerleri.....	77
Şekil 7.13. 850°C’de borlanan GS 60 çelik numunelerin yüzey altından alınan mikro sertlik değerleri.....	78
Şekil 7.14. 900°C’de borlanan GS 60 çelik numunelerin yüzey altından alınan mikro sertlik değerleri.....	78
Şekil 7.15. 950°C’de borlanan GS 60 çelik numunelerin yüzey altından alınan mikro sertlik değerleri.....	79

Sayfa

Şekil 7.16. İşlemsiz AISI 8640 çeliğinin polarizasyon eğrisi	81
Şekil 7.17. 850 °C’de 2 saat borlanan AISI 8640 çeliğinin polarizasyon eğrisi	81
Şekil 7.18. 950 °C’de 8 saat borlanan AISI 8640 çeliğinin polarizasyon eğrisi	82
Şekil 7.19. AISI 8640 çeliğinin korozyon akımı ve korozyon potansiyeli değerleri ...	83
Şekil 7.20. İşlemsiz GS 60 çeliğinin polarizasyon eğrisi.....	84
Şekil 7.21. 850 °C’de 2 saat borlanan GS 60 çeliğinin polarizasyon eğrisi.....	84
Şekil 7.22. 950 °C’de 8 saat borlanan GS 60 çeliğinin polarizasyon eğrisi.....	85
Şekil 7.23. AISI 8640 Çeliğinin korozyon akımı ve korozyon potansiyeli değerleri ..	86
Şekil 7.24. AISI 8640 çeliğinin daldırılarak yapılmış korozyon sonrası zamana bağlı olarak ağırlık kayıplarının değişimi	87
Şekil 7.25. GS 60 çeliğinin daldırılarak yapılmış korozyon sonrası zamana bağlı olarak ağırlık kayıplarının değişimi	87
Şekil 7.26. Farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış AISI 8640 çeliğinin 1000 mesh Al ₂ O ₃ zımparada ve 10N yük altındaki aşınma durumu.....	88
Şekil 7.27. Farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış AISI 8640 çeliğinin 1000 mesh Al ₂ O ₃ zımparada ve 20N yük altındaki aşınma durumu.....	89
Şekil 7.28. Farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış AISI 8640 çeliğinin 1200 mesh Al ₂ O ₃ zımparada ve 10N yük altındaki aşınma durumu.....	89
Şekil 7.29. Farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış AISI 8640 çeliğinin 1200 mesh Al ₂ O ₃ zımparada ve 20N yük altındaki aşınma durumu.....	90
Şekil 7.30. Farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış GS 60 çeliğinin 1000 mesh Al ₂ O ₃ zımparada ve 10N yük altındaki aşınma durumu	90
Şekil 7.31. Farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış GS 60 çeliğinin 1000 mesh Al ₂ O ₃ zımparada ve 20N yük altındaki aşınma durumu	91
Şekil 7.32. Farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış GS 60 çeliğinin 1200 mesh Al ₂ O ₃ zımparada ve 10N yük altındaki aşınma durumu	91
Şekil 7.33. Farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış GS 60 çeliğinin 1200 mesh Al ₂ O ₃ zımparada ve 20N yük altındaki aşınma durumu	92
Şekil 7.34. Borlanmamış AISI 8640 ve GS 60 çeliklerinin 1000 ve 1200 mesh Al ₂ O ₃ zımparada aşınma kayıplarının karşılaştırılması	92
Şekil 7.35. İşlemsiz AISI 8640 çeliğinin 1000 mesh ve 1200 mesh Al ₂ O ₃ zımparada 10 N yük altında aşınmış yüzeyinin görüntüsü	93
Şekil 7.36. İşlemsiz AISI 8640 çeliğinin 1000 mesh ve 1200 mesh Al ₂ O ₃ zımparada 20 N yük altında aşınmış yüzeyinin görüntüsü	94

Şekil 7.37. 850°C’de borlanan AISI 8640 çelik numunelerin 1000 mesh ve 1200 mesh Al ₂ O ₃ zımparada 10 N yük altında aşınmış yüzeyinin görüntüsü	94
Şekil 7.38. 850°C’de borlanan AISI 8640 çelik numunelerin 1000 mesh ve 1200 mesh Al ₂ O ₃ zımparada 20 N yük altında aşınmış yüzeyinin görüntüsü	94
Şekil 7.39. 950°C’de borlanan AISI 8640 çelik numunelerin 1000 mesh ve 1200 mesh Al ₂ O ₃ zımparada 10 N yük altında aşınmış yüzeyinin görüntüsü	95
Şekil 7.40. 950°C’de borlanan AISI 8640 çelik numunelerin 1000 mesh ve 1200 mesh Al ₂ O ₃ zımparada 20 N yük altında aşınmış yüzeyinin görüntüsü	95
Şekil 7.41. Döküm durumu GS 60 çeliğinin 1000 mesh ve 1200 mesh Al ₂ O ₃ zımparada 10 N yük altında aşınmış yüzeyinin görüntüsü.....	96
Şekil 7.42. Döküm durumu GS 60 çeliğinin 1000 mesh ve 1200 mesh Al ₂ O ₃ zımparada 20 N yük altında aşınmış yüzeyinin görüntüsü.....	96
Şekil 7.43. 850°C’de borlanan GS 60 çelik numunelerin 1000 mesh ve 1200 mesh Al ₂ O ₃ zımparada 10 N yük altında aşınmış yüzeyinin görüntüsü	96
Şekil 7.44. 850°C’de borlanan GS 60 çelik numunelerin 1000 mesh ve 1200 mesh Al ₂ O ₃ zımparada 20 N yük altında aşınmış yüzeyinin görüntüsü	97
Şekil 7.45. 950°C’de borlanan GS 60 çelik numunelerin 1000 mesh ve 1200 mesh Al ₂ O ₃ zımparada 10 N yük altında aşınmış yüzeyinin görüntüsü	97
Şekil 7.46. 950°C’de borlanan GS 60 çelik numunelerin 1000 mesh ve 1200 mesh Al ₂ O ₃ zımparada 20 N yük altında aşınmış yüzeyinin görüntüsü	97
Şekil 7.47. İşlemsiz AISI 8640 çeliğinin 1000 ve 1200 mesh Al ₂ O ₃ zımparada 20N yük altında aşınmış yüzeylerin SEM görüntüsü	98
Şekil 7.48. 850 °C 2 saat borlanmış AISI 8640 çeliğinin 1000 ve 1200 mesh Al ₂ O ₃ zımparada 20N yük altında aşınmış yüzeylerin SEM görüntüsü	98
Şekil 7.49. 850 °C 8 saat borlanmış AISI 8640 çeliğinin 1000 ve 1200 mesh Al ₂ O ₃ zımparada 20N yük altında aşınmış yüzeylerin SEM görüntüsü	99
Şekil 7.50. 950 °C 2 saat borlanmış AISI 8640 çeliğinin 1000 ve 1200 mesh Al ₂ O ₃ zımparada 20N yük altında aşınmış yüzeylerin SEM görüntüsü	99
Şekil 7.51. 950 °C 8 saat borlanmış AISI 8640 çeliğinin 1000 ve 1200 mesh Al ₂ O ₃ zımparada 20N yük altında aşınmış yüzeylerin SEM görüntüsü	100
Şekil 7.52. İşlemsiz GS 60 çeliğinin 1000 ve 1200 mesh Al ₂ O ₃ zımparada 20N yük altında aşınmış yüzeylerin SEM görüntüsü	100
Şekil 7.53. 850 °C 2 saat borlanmış GS 60 çeliğinin 1000 ve 1200 mesh Al ₂ O ₃ zımparada 20N yük altında aşınmış yüzeylerin SEM görüntüsü .	101
Şekil 7.54. 850 °C 8 saat borlanmış GS 60 çeliğinin 1000 ve 1200 mesh Al ₂ O ₃ zımparada 20N yük altında aşınmış yüzeylerin SEM görüntüsü .	101

Sayfa

Şekil 7.55. 950 °C 2 saat borlanmış GS 60 çeliğinin 1000 ve 1200 mesh Al ₂ O ₃ zımparada 20N yük altında aşınmış yüzeylerin SEM görüntüsü.	102
Şekil 7.56. 950 °C 8 saat borlanmış GS 60 çeliğinin 1000 ve 1200 mesh Al ₂ O ₃ zımparada 20N yük altında aşınmış yüzeylerin SEM görüntüsü.	102
Şekil 7.57. AISI 8640 çeliğın, aşınmış yüzeylerin yüzey pürüzlülüğü Ra (µm)	104
Şekil 7.58. GS 60 çeliğın, aşınmış yüzeylerin yüzey pürüzlülüğü Ra (µm)	105
Şekil 7.59. 850 °C’de 2 saat borlanmış AISI 8640 çelik numunenin x-ışını analizi	105
Şekil 7.60. 950 °C’de 8 saat borlanmış AISI 8640 çelik numunenin x-ışını analizi	106
Şekil 7.61. 850 °C’de 2 saat borlanmış GS 60 çelik numunenin x-ışını analizi	106
Şekil 7.62. 950 °C’de 8 saat borlanmış GS 60 çelik numunenin x-ışını analizi	107

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Bor elementinin fiziksel özellikleri.....	4
Çizelge 2.2. Ticari önemi olan bor mineralleri	5
Çizelge 2.3. FeB ve Fe ₂ B'nin bazı fiziksel özellikleri	9
Çizelge 2.4. Katı ortamda kullanılan bazı bor kaynakları.....	11
Çizelge 2.5. Sıvı ortamda borlamada kullanılan bor sağlayıcı bileşikler.....	12
Çizelge 2.6. Borlanmış çeliklerin sertlik değerlerinin diğer işlemlerle ve sert malzemelerle karşılaştırılması.....	18
Çizelge 2.7. Borlama işlemine tabi tutulmuş bazı demir esaslı malzemelerin başlıca uygulama alanları	20
Çizelge 4.1. AISI 8640 çeliğinin kimyasal analizi (%).....	43
Çizelge 4.2. AISI 8640 çeliğinin ısıtılma durumu	43
Çizelge 4.3. AISI 8640 çeliğinin fiziksel nitelikleri	43
Çizelge 4.4. GS 60 çeliğinin fiziksel nitelikleri	45
Çizelge 4.5. GS 60 çeliğinin ısıtılma durumu	45
Çizelge 4.6. Dökme çeliklerin kimyasal bileşimi (%)	47
Çizelge 5.1. Korozyon türleri.....	51
Çizelge 6.1. 8640 çeliğin bileşimi, % ağı.....	62
Çizelge 6.2. GS 60 çeliğin bileşimi, % ağı.....	62
Çizelge 7.1. Korozyon akımı ve korozyon potansiyeli değerleri.....	82
Çizelge 7.2. Korozyon akımı ve korozyon potansiyeli değerleri.....	85
Çizelge 7.3. AISI 8640 çeliğin, aşınmış yüzeylerin yüzey pürüzlülük değerleri Ra (µm)	103
Çizelge 7.4. GS 60 çeliğin, aşınmış yüzeylerin yüzey pürüzlülük değerleri Ra (µm)	104

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

γ	: Östenit
α	: Ferrit
FeB	: Demir Borür
B	: Bor
C	: Karbon
Cr	: Krom
Mn	: Mangan
HNO ₃	: Nitrik asit
E _{corr}	: Korozyon potansiyeli
I _{corr}	: Korozyon akımı
mV	: Milivolt
mA	: Miliamper
°C	: Santigrat derece
N	: Newton

KISALTMALAR

- AISI : American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)
- GS : DIN: Deutsches Institut für Normung (Alman Cumhuriyetinin Enstitüsü'nde) malzemenin gösterimi.
- SEM : Taramalı elektron mikroskobu
- HRC : Rockwel sertliği
- HV : Vickers sertliği
- HMV : Mikro vickers sertliği
- HB : Brinell sertliği
- DIN : Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)
- EN : Avrupa Normu
- TS : Türk Standardı
- Ekabor 2 : Katı borlamada kullanılan ve patentlerle korunan bor alaşımları tozu.
- SCE : Doygun kalomel elektrot (Satiated Calomel Electrode)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Çevre ve servis şartları kullanım sürecinde malzemeleri etkilemekte ve malzemelerin bozulmalarına sebep olmaktadır. Özellikle her endüstri alanında çok ciddi ekonomik kayıplara neden olan aşınma mekanizması dikkatle incelenmesi gereken teknolojik öneme sahip bir konudur. Malzemelerde meydana gelen bu bozulmalar malzemenin çalışma prensiplerini olumsuz bir şekilde etkilemektedir. Olumsuz koşullar malzemelerin hem içyapısında hem de yüzeyinde değişime neden olduğu için bu problemin çözümü ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Bu nedenle günümüzde yüzey mühendisliği önem kazanmıştır. Yüzey sertleştirme işlemi özel bir işlemdir. Metalin iç kısmının nispeten tok olması istenirken, yüzeyinin belirli bir kalınlıkta sertleştirilmesi gerekmektedir. Yüzey sertleştirmenin amacı; metal parçaların yüzeylerinin sertliğini, aşınma direncini korozyon direncini ve bununla birlikte yorulma ömrünü arttırmaktır.

Günümüzde hammadde ve enerji kaynaklarının sınırlı oluşu, bu kaynakların verimli kullanılmasını gerektirmektedir. Bu nedenle, makine ve makine parçalarından daha verimli ve daha uzun süre faydalanılabilinmelidir. Makine parçalarının ömrünü belirleyen etkenlerden biri olan aşınma ve sürtünme üzerinde geniş araştırmalar yapılmaktadır. Aşınma miktarları azaltılırsa, makineler ve makine parçalarının ömrü uzayacak, ayrıca sürtünme kayıplarının azaltılması ile de büyük miktarlarda enerji tasarrufu sağlanacaktır.

Makine ve ekipmanlarda meydana gelen ekonomik kayıpların büyük çoğunluğu korozyon ve aşınmadan kaynaklanır. Bu kayıpları azaltmak için kullanılan malzemelerin yüzey özellikleri geliştirilmelidir. Yoğun kullanım koşulları daha yüksek performansa sahip malzemelere olan ihtiyacı arttırmaktadır. Bu amaçla yüzey kalitesini ve performansı artırmak için kullanılan yöntemlerden birisi de yüzeyin

borlanmasıdır. Borlama, malzeme yüzeyinde meydana gelen çizilme, aşınma ve korozyon direncini geliştirmektedir. Borlama ile parça yüzeyinde bir metalik bor tabakası meydana gelir. Bor tabakası bor atomlarının yüksek sıcaklıklarda ana metal içine difüzyonu ile meydana gelir. Bu bir kaplama işlemi değildir. Borlama gaz, sıvı tuz banyosu (elektrolizle birlikte ve/veya elektrolizsiz) ve katı (kutu borlama) ortamlarında yapılabilir.

Bor bileşikleri üstün özelliklere sahip malzemeler oldukları için son yıllarda metalik malzemeler üzerine borlama yapma ilgi odağı olmuştur. Böylece borlanan malzemenin matris özellikleri yanında, yüzeyinde oluşacak bor bileşiklerinin özelliklerine bağlı olarak aşınma, korozyon direnci ve üstün mekanik özelliklerden faydalanmak mümkün olmaktadır.

Bor ile yüzey sertleştirmenin diğer yüzey sertleştirme yöntemlerinden üstünlüğü; yüzey tabakasının çok sert, sürtünme katsayısının ise çok düşük olmasının yanı sıra, asit ve bazlarının oluşturacakları korozyona ve yüksek sıcaklık korozyonuna direnç göstermesidir. Ayrıca borlama işleminin alaşımsız çeliklere uygulanabilmesi ekonomik açıdan bir üstünlük teşkil etmektedir. Çelik malzemelerin yüksek yüzey sertliği, mükemmel aşınma ve korozyon direnci borlama ile sağlanabilir. Literatürde; çelik malzemenin borlanmasıyla ilgili yapılan çalışmalar yoğun olarak adhesif aşınma davranışı ile ilgilidir ve abrasif aşınma davranışıyla ilgili az sayıda çalışma mevcuttur.

Bu tez çalışmasında numune olarak 8640 Islah çeliği ile alaşımsız düşük karbonlu GS 60 çeliği borlanarak incelenmiştir. Borlama işlemi katı ortamda borlama tekniği kullanılarak yapılmıştır. Borlama malzemesi olarak ticari şekilde piyasada bulunan EKabor® 2 tozu kullanılmıştır. Borlama süresinin ve sıcaklığın artırılmasıyla aşınma kaybı, bor katman kalınlığı, mikro sertlik ve korozyon dayanımları incelenmiştir. X-ışını kırınım analizi ve optik incelemelerle borürlerin şekli ve yapısı, SEM ile de aşınma yüzeyleri incelenmiştir.

BÖLÜM 2

BOR ve BORLAMA

2.1. BOR

Tüm canlıların yaşantısını devam ettirmesi için doğada bulunan vazgeçilmez elementlerden birisidir. Bor dünyada en yaygın kullanım alanına sahip olan elementlerin başında gelmektedir. Sanayinin en önemli temel taşlarından birisi olan bor ürünleri, katma değerinin çok yüksek olması nedeniyle, dünyada belli başlı firmaların elindedir. Büyük rezervleri ve yüksek kalitede cevher avantajı ile Türkiye bu pazarda çok önemli bir paya sahiptir [1].

Tek başına dünya Bor rezervlerinin yaklaşık % 70'ini elinde bulunduran ülkemiz, bu cevherlerin değerlendirilmesinde yetersiz durumdadır. Birçok bilim adamının “21. yüzyılın petrolü” olarak tanımladığı ve uzay teknolojisinden, bilişim sektörüne, metalurjiden nükleer teknolojiye kadar daha sayamadığımız pek çok sanayi dalında kullanılan Bor mineralleri ülkemizin elinde bulunan en stratejik varlık konumundadır [2].

Periyodik sistemin üçüncü grubunun başında bulunan ve atom numarası 5 olan bor elementi, kütle numaraları 10 ve 11 olan iki kararlı izotopundan oluşur. Yer kabuğunun 51. yaygın elementi olan bor tabiatta boratlar şeklinde okyanuslarda, tortu kayalarda, kömürde, katmanlarına ayrılan yumuşak kayalarda ve bazı topraklarda bulunmaktadır. Yer kabuğunda ortalama 10 mg/kg oranında ve okyanuslarda 4,5 mg/kg oranında bor mevcuttur [1,3,4]. Metal ile ametal arası yarı iletken özelliklere sahip olan bor elementi doğada tek başına değil, başka elementlerle bileşikler halinde bulunur [5]. Bor tabiatta her zaman oksijene bağlı olarak bulunmaktadır. Oda sıcaklığında katı halde bulunan bor elementi, 3 ppm'lik

konsantrasyon değerine sahiptir [6]. Bor elementinin özellikleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Bor elementinin fiziksel özellikleri [2,7,8].

Özellik	Değeri
Atom Numarası	5
Atom ağırlığı	10.811 ±0.005 veya 0.007
Ergime noktası (°C)	2190 ± 20
Kaynama noktası (°C)	3660
Isıl Genleşme Katsayısı (25 -1050 °C arası, 1°C için)	5x10 ⁶ - 7x10 ⁶
Proton ve Elektron Sayısı	5
Nötron Sayısı	6
Yogunluğu (gr/cm ³)	2,46
Molar Hacim (cm ³)	4,39
Knoop Sertliği (HK)	2100 – 2580
Mohs Sertliği (Elmas – 15)	11
Vickers sertliği (HV)	5000
Atom Yarıçapı (A ^o)	0,46
İyon Yarıçapı (A ^o)	0,23

Yüksek konsantrasyonda ve ekonomik boyutlardaki bor yatakları, borun oksijen ile bağlanmış bileşikleri olarak daha çok Türkiye ve ABD'nin kurak, volkanik ve hidrotermal aktivitesinin yüksek olduğu bölgelerde bulunmaktadır [1].

2.1.1. Ticari Bor Mineralleri

Çizelge 2.2'de verildiği gibi ticari öneme sahip olan bor mineralleri; tinkal, kolemanit, kernit, üleksit, pandemit, borasit, szaybelit, hidroborasit gibi minerallerdir.

Çizelge 2.2. Ticari önemi olan bor mineralleri [1].

Mineral	Formülü	% B ₂ O ₃	Bulunduğu yer
Boraks (Tinkal)	Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O	36.6	Kırka, Emet, Bigadiç, A.B.D
Kernit (Razorit)	Na ₂ B ₄ O ₇ ·H ₂ O	51.0	Kırka, A.B.D., Arjantin
Üleksit	NaCaB ₅ O ₉ ·8H ₂ O	43.0	Bigadiç, Kırka, Emet, Arjantin
Propertit	NaCaB ₅ O ₉ ·5H ₂ O	49.6	Kestelek, Emet, A.B.D
Kolemanit	Ca ₂ B ₆ O ₁₁ ·5H ₂ O	50.8	Emet, Bigadiç, Küçükler, A.B.D
Pandermit (Priseit)	Ca ₄ B ₁₀ O ₁₉ ·7H ₂ O	49.8	Sultançayır, Bigadiç
Borasit	Mg ₃ B ₇ O ₁₃ Cl	62.2	Almanya
Szaybelit	MgBO ₂ (OH)	41.4	B.D.T. (Eski S.S.C.B.)
Hidroborasit	CaMgBO ₁₁ ·6H ₂ O	50.5	Emet

2.1.2. Bor'un Tarihçesi

İlk boraks kaynağının yaklaşık 4000 yıl önce Tibet göllerinden elde edildiğine dair bilgiler bulunmuştur. Sümerler ve Etiler tarafından altın ve gümüş işçiliğinde kullanılmıştır. Babilliler tarafından Uzak Doğu'dan getirilerek altın işlemede kullanılan boraks, Mısırlılar tarafından da mumyalamada, tıpta ve metalürji işlerinde kullanılmıştır. Himalayalar'dan koyunlara bağlanan torbalarla Hindistan'a getirilen boraks, Romalılar tarafından cam yapımında, eski Yunanlılar tarafından da temizlik işlerinde kullanılmıştır [3,9,10].

İlaç olarak ilk kez Arap doktorlar tarafından M.S. 875 yılında kullanılmıştır. Çinliler tarafından seramik ve cam üretiminde kullanılmıştır. Avrupa'ya ise 12.-13. Yüzyılda Marco Polo tarafından Tibet'ten getirilmiştir. Amerika'da ise ilk kez 18. Yüzyılda And Dağları'nda bulunmuştur [3,9]. Elementer bor 1808 yılında Fransız Kimyacı Gay-Lussac ile Baron Louis Thenard ve bağımsız olarak İngiliz kimyacı Sir Humphry Davy tarafından bulunmuştur [11]. Ancak %99 saflıktaki ilk kristalize bor 1909 yılında elde edilebildi [5].

Türkiye’de ilk işletmenin 1861 yılında çıkartılan Maadin Nizannamesi uyarınca 1865 yılında bir Fransız şirketine işletme imtiyazı verilmesiyle başladığı bilinmektedir [10]. 1935 yılında MTA ve Etibank gibi kamu kuruluşlarına arama ruhsatı verilmiş, 1944’de millileştirmelere girişilmiş ve son olarak Türk Boraks adı altında faaliyet gösteren İngiliz Borax Consolidated Ltd. Şti.’nin imtiyazlarının 1968’de Etibank’a devredilmesiyle de maden işletmeciliği tamamen Türk firmalarına geçmiştir [12].

1983 yılında çıkartılan 2840 sayılı kanunla devletçe işletilecek madenler kapsamında bor madeninin işletme hakkı Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü’ne verilmiştir. Dünyadaki önemli bor yataklarının Türkiye, ABD ve Rusya’da olduğu bilinmektedir. Dünyada toplam 1176 milyon ton B₂O₃ olup bu rezervin %72,2’si Türkiye’dedir. ABD %6,8, Rusya %8,5, Çin %3,1 ve Şili %3,5’lik rezerve sahiptir [13]. Türkiye bor konsantreleri ve bor kimyasalları üretimi ve satışında da dünya lideridir.

2.1.3. Bor Ürünlerinin Başlıca Kullanım Alanları

Çok çeşitli sektörlerde kullanılan bor mineralleri ve ürünlerinin kullanım alanları giderek artmaktadır. Üretilen bor minerallerinin %10’a yakın bir bölümü doğrudan mineral olarak tüketilirken, geriye kalan kısmı bor ürünleri elde etmek için kullanılmaktadır.

Ticari anlamda borlar, genelde içerdikleri B₂O₃ içeriğine göre tanımlanmakta ve satılmaktadır. Diğerleri içinde en fazla ticareti yapılan bor ürünleri “boraks penhidrat” ve “borik asit” olmaktadır. Kullanım alanları bölgelere göre değişiklikler göstermektedir [3].

Bor’un belli başlı kullanım alanları kısaca şöyle sıralanabilir: [1,3,9,10,14].

1. Cam ve Cam Elyaf Sanayi: Hammaddenin erime noktasını düşürür, erimiş ortamın viskozitesini düşürür. Camın termal genleşme katsayısını düşürür. Camın kırılma indisini büyütür ve camın parlaklığını saydamlığını artırır.
2. Temizleme Beyazlatma Sanayi: Güçlü bir beyazlatıcıdır. Lekeleri çözer. Ph’ı

dengeler suyu yumuşatır, yağları parçalar, aktif oksijeni dengeler ve anti bakteriyeldir.

3. Seramik ve Emaye Sanayi: Seramiklerin sırlanmasında ve emaye sanayinde kullanılır. Sırın kıvamlılığını düşürür, sırın yüzey gerilimin düşürür, parlaklığı ve saydamlığı artırır.
4. Tekstil Sanayi: Yanmayı geciktirici özelliğinden dolayı, cam elyafı halinde, tekstil sektöründe kullanılır. Bunun yanı sıra, kumaş boyalarında ve aprelemede kullanılmaktadır.
5. Metalürji Sanayi: Erime sıcaklığını düşürür, çeliği sertleştirir, fırın tuğlalarının aşınmasını azaltır. Borlama sanayinde kullanılan elektrolitlerin oluşturulmasında ve lehimleme işlemlerinde de kullanılmaktadır.
6. Tarım Sanayi: Çok az miktarda bor bitkilerin gelişmesine yardım eder. bu nedenle gübrelerde kullanılmaktadır. Fakat borun fazlası bitkiler üzerinde öldürücü etki yapar. Bu özellikten yararlanılarak, yabancı otlar ile mücadelede kullanılmaktadır.
7. Nükleer Sanayi: Bor izotopları nükleer reaksiyonların denetlenmesine yardımcı olur. Çünkü B^{10} ve B^{11} izotopların nötron absorblama tesir kesiti yükselir. Bazı tip reaktörlerde fazla reaktiviteyi önlemek için soğutma suyuna borik asit ilave edilir.

2.2. BORLAMA

Metal ve alaşımların yüzeylerini difüzyon yoluyla çeşitli elementlerle sertleştirme işlemleri bu metal ve alaşımların mekanik özelliklerini, aşınma ve korozyon dirençlerini arttırmak amacıyla yapılır. Difüzyon ile yüzey sertleştirme işlemlerinde en çok kullanılan elementler karbon, silisyum, krom, titanyum ve bordur.

Demir ve çeliğin yüzey özelliklerini iyileştirmek amacı ile kullanılan yöntemlerden biri de borlamadır [15]. Borlanmış çelik parçalar makine mühendisliği ve otomotiv sektörlerinde çeşitli tribolojik uygulamalarda mükemmel performans sergilemektedir [16]. Son yirmi yılda borlama giderek daha da etkin bir yüzey koruma yöntemi haline gelmiştir [17]. Çeliklerin borlanması adhesif ve abrasif aşınma ile başa çıkmak için kullanılmaktadır ve bu hususta başarılı bir yöntemdir [18]. Çelik yüzeyinde

demir borür oluşturulması borlama işleminin en bilinenlerindedir [19]. Borlama işlemi aşınma ve sürtünmenin kontrolünün öncelikli öneme sahip olduğu birçok triboloji uygulamasında en önde gelen seçeneklerden biridir [20].

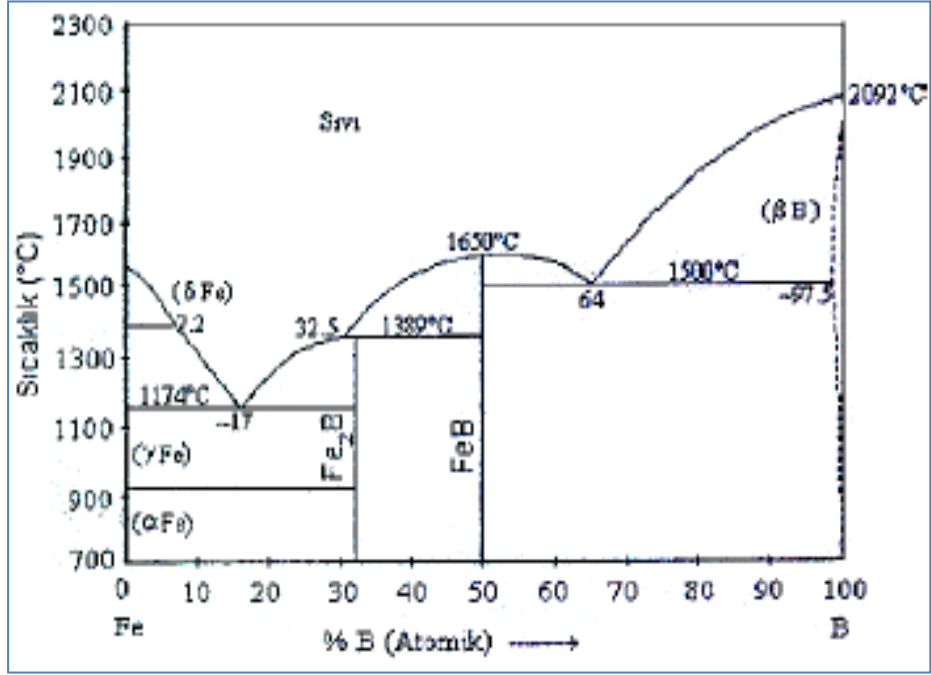
Demir ürünlerinin borlanması işlemi genellikle 840 °C ile 1050 °C sıcaklık aralığında yapılır. Yüzey sertlikleri ise, oluşan FeB ve Fe₂B fazlarının sert olmasından dolayı, 1300–2000 HV değerine ulaşabilmektedirler. Hareketli makine parçalarında, kollarda ve birçok kalıpta, yüzeyi borlanmış çelikler ve KGDD'ler kullanılmaktadır [20,21].

Nitrürasyon, karbürizasyon ve benzeri alışılagelmiş yüzey sertleştirme işlemlerinde 600–1100 HV'lik sertliği elde edilirken, borla işleminde ise 1500–2000 HV'lik sertliğin yanında çok düşük sürtünme katsayıları elde edilir. Borlama, yüksek sıcaklıkta çelik malzeme yüzeyinde bor difüzyonuyla Fe₂B gibi bileşiklerin elde edilmesidir [22]. Borlamanın diğer yüzey sertleştirme yöntemlerinden bir diğer farkı da, borlamada karakteristik yapılara ve belirli bileşimlere sahip borür tabakalarının oluşmasıdır. Diğer yöntemlerde difüzyona uğramış yüzeyle alt tabaka arasında bileşimce yavaş bir geçiş vardır [22]. Borlama prosesi, oksidasyon direnci, korozyon direnci ve aşınma direnci gibi farklı istekleri uzlaştırmak için yüzeyde ya da yüzeye yakın bölgelerde özellikleri değiştirici bir yöntem olarak kullanılır [22].

2.2.1. Demir - Bor Denge Diyagramı

Hansen'in 1958 yılında belirttiği demir -bor denge diyagramına göre, ağırlık olarak %8.83 bor oranında Fe₂B ve %16.23 bor oranında FeB olmak üzere iki tür borür ve ergime noktası 1149 °C olan %3,8 bor oranında bir ötektik oluşmaktadır. Fe-B sisteminde alaşım elementleri örneğin %1 C, ötektik sıcaklığının 50°C aşağıya düşürür. Şekil 2.1'de Fe-B denge diyagramı gösterilmiştir.

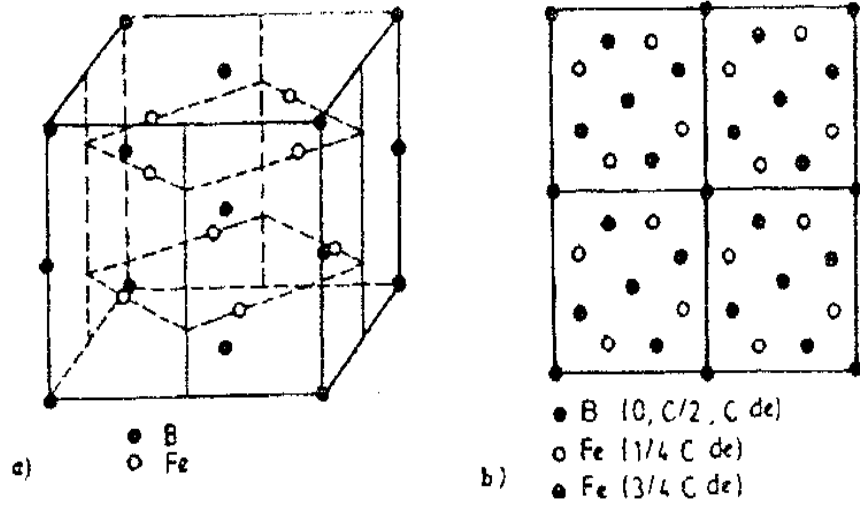
FeB kafesi ortorombik yapıya sahiptir ve birim kafes 4Fe ve 4B atom içerir. Bor atomları c-ekseni yönünde zikzak şekilli zincirler oluştururlar bor atomları arasındaki mesafe (B-B) 1.77 Å'dur. FeB'nin (001) düzlemindeki projeksiyonu Şekil 2.2'de gösterilmektedir. Fe₂B ise 12 atomlu olup tetragonal yapıdadır [22]. FeB ve Fe₂B'nin bazı fiziksel özellikleri ise Çizelge 2.3'de verilmiştir [23].



Şekil 2.1. Demir-Bor denge diyagramı [23].

Çizelge 2.3. FeB ve Fe₂B'nin bazı fiziksel özellikleri [22].

Özellik	Fe ₂ B	FeB
Ergime Noktası, (°C)	1390	1550
Genleşme Katsayısı (1000 °C), (K ⁻¹)	8,6.10 ⁻⁶	10-16.10 ⁻⁶
İletkenlik Katsayısı (1000 °C , W/cm °C)	0,1-0,3	0,1-0,2
Özdirenç (20 °C), μ.ohm.cm	≈ 38	≈ 80
Küri Sıcaklığı, °C	742	325
Teorik Yoğunluk, gr/cm ³	7,43	6,75
Kristal Kistemi	Tetragonal Hacim Merkezli	Ortorombik
Kafes Parametreleri, A °	a = 5,075 b = 4,249	a = 4,053 b = 5,495 c = 2,946



Şekil 2.2. a) Fe_2B kristalinin birim kafesi ve b) (001) düzlemindeki projeksiyonu [22].

2.2.2. Borlama İşlemi Ve Reaksiyon Mekanizması

Borlama, termokimyasal yüzey sertleştirme işlemi olup, bor elementinin yüksek sıcaklıkta metal yüzeyine yayılması ile yüzeyde borür tabakası elde etme işlemidir [24].

İşlem esas malzeme ve bor kaynağı arasındaki kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonlara dayanmaktadır. Eğer demir ve çelik türü malzemeler borlanıyorsa demir borürler oluşur [22].

Borlamada borür tabakasının oluşumu;

1. Kimyasal yöntemler (Katı, sıvı ve gaz ortamda borlama) ile veya,
2. Fiziksel yöntemler (Bor iyon aşılama, fiziksel vakum biriktirme, saçılma ve iyon kaplama gibi) ile sağlanabilir.

Borlama işlemi ile; amorf bor, B_4C , $Na_2B_4O_7$, B_2H_6 gibi bor verici bileşikler, alkali metaller, amonyum borflorürler KBF_4 gibi aktivatörler ve SiC , Al_2O_3 vb dolgu maddeleriyle hazırlanan borlayıcı ortamda 800–1050 °C sıcaklıklar arasında, 1–8

saatlik işlem sürelerinde iş parçası yüzeyinde sert, aşınmayan, oksitlenmeyen ve özellikle asitlere ve bazı metallerin ergiyik banyolarındaki korozyona karşı dirençli, iyi elektrik iletkenliğine sahip borür tabakası veya tabakaları elde edilir. Elde edilen tabakalar, kullanılan yöntem, ortamın bor potansiyeline, borlanacak malzeme, işlem sıcaklığı ve süresine bağlıdır [22].

2.2.2.1. Katı Ortamda Borlama

Sementasyona benzeyen bu yöntemde işlem kolaylığı, toz bileşiminin kolayca değiştirilebilmesi, gerekli cihaz ve donanımın basitliği ve ekonomik yönden de ucuz olması gibi faktörler dolayısıyla geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bor karbür, amorf bor ve ferrobor gibi bor verici bileşikler, alkali metaller, amonyum bor florürler, KBF_4 , AlF , $NaCl$, NH_4Cl gibi aktivatörler ve SiC ve Al_2O_3 gibi dolgu maddeleri veya reaktif olmayan bileşikler belirli oranda karıştırılarak yapılır. Borlama işlemi alaşımsız çelik, paslanmaz çelik veya alümina kutular içerisine, her bir numunenin etrafında en az 1–2 cm kalınlıkta olacak şekilde doldurularak, ya hava sızdırmaz bir kapakla kapatılır veya nötr bir atmosferde yapılır [22]. Çizelge 2.4’de katı ortamda kullanılan bazı bor kaynakları verilmiştir [25].

Katı ortamda borlamada, borlama bileşikleri pasta şeklinde numune yüzeyine sürülebilir. Bu durumda cam suyu gibi gliserin maddeler bağlatıcı olarak kullanılır. Hazırlanan kutular, önceden işlem sıcaklığına (800-1000 °C) getirilmiş olan fırınlar içerisine, işlem süreleri de 1–8 saat arasında olmak suretiyle yerleştirilir ve borlama işlemi yapılır [22].

Çizelge 2.4. Katı ortamda kullanılan bazı bor kaynakları [25].

Malzeme	Formülü	Molekül ağırlığı	Teorik bor içeriği (%)	Ergime sıcaklığı (°C)
Amorf bor	B	10,82	95–97	2050
Ferro bor	Fe-B	-	17–19	-
Borkarbür	B_4C	55,29	77,28	2450

2.2.2.2. Gaz Ortamda Borlama

Bor hidritlerinin temel parçalanması sonucu elde edilen buharla yapılan borlama işlemidir. Bu işlemde sıcaklık yükseltilebilir ve daha homojen difüzyon tabakası elde edilebilir. İşlem özellikle karışık şekilli parçaların borlanması ve homojen tabaka elde edilmesi istenilen parçalarda kullanılan bir işlemdir. Ancak zehirlilik ve kirlilik gibi çevre şartları bu işlemi sınırlandıran faktörlerdir [24].

2.2.2.3. Sıvı Ortamda Borlama

Metalik malzemenin bor bileşimli ergimiş tuz banyosuna daldırılmasıyla yapılmaktadır. Ergimiş tuz banyosu değişik oranlarda B_4C , BaO , KCl , $NaCl$ bileşiklerini içerir. BaO ilavesi, difüzyonu önemli ölçüde iyileştirir. Oluşan demir-bor tabakalarının kalınlıkları 100–200 μm kadardır. Zehirlilik, patlayıcılık, doğa ve çevresel kirlilik gibi dezavantajlar bu yöntemin kullanımını sınırlamaktadır. Sıvı ortam borlamasında, işlem sonunda borlayıcı ortam bileşenlerinin parça yüzeyine yapışması ve bunların temizlenmesi için ek bir işlem gerekmesi sıvı borlamanın bir olumsuzluğudur [24]. Çizelge 2.5’de sıvı ortamda borlamada kullanılan bor sağlayıcı bileşikler verilmiştir [22].

Çizelge 2.5. Sıvı ortamda borlamada kullanılan bor sağlayıcı bileşikler [22].

Malzeme	Formülü	Molekül ağırlığı	Teorik bor miktarı (%)	Ergime sıcaklığı (°C)
Boraks	$Na_2B_4O_7, 10H_2O$	381,42	11,35	-
Susuz boraks	$Na_2B_4O_7$	201,26	21,50	741
Borik asit	HBO_2	43,83	24,69	-
Sodyum borflorür	$NaBF_4$	109,81	9,85	-
Borikasit (susuz)	B_2O_3	69,64	31,07	450
Borkarbür	B_4C	55,29	78,28	2450

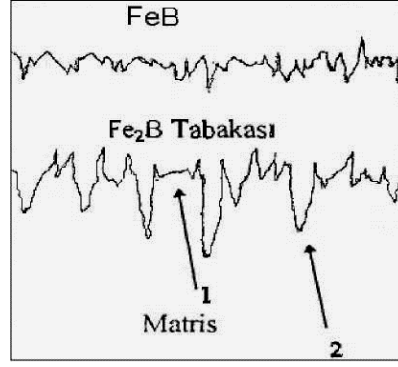
2.2.3. Demir Borürlerin Büyüme Mekanizması

Demir borürler, yüksek sertliğe sahip seramiklerin ve metallerin termal ve elektriksel iletkenlik gibi genel özelliklerini birarada bulunduran çok ilginç bileşiklerdir [23].

Borlama işlemi sonucunda oluşan borür fazları, borlama ortamının aktif bor konsantrasyonuna bağlı olarak, yüzey çizikleri ve pürüzlülükleri gibi makro hataların, tane sınırları ve dislokasyonlar gibi mikro hataların bulunduğu bölgelerde başlamaktadır. Özellikle düşük aktif bor konsantrasyonunun bulunduğu ortamlarda, bu bölgeler borür fazının oluşabildiği yegâne yerlerdir [23].

Yapılan araştırmalarda, ilk oluşan borür fazının Fe_2B olduğu, fakat Mösbauer elektron spektroskopu ile yapılan ölçümlerde Fe_2B fazı üzerinde FeB fazının bulunduğu ve en dış yüzeyde ise FeB_{1+x} fazının yer aldığı görülmektedir [25]. Yapılan araştırmalarda, borür tabakasının oluşumu konusunda genel olarak savunulan ortak nokta, işlemin difüzyon kontrollü olmasıdır. Birçok araştırmada, hacim merkezli tetragonal yapıya sahip Fe_2B fazının çoğu zaman yüzeye dik olan [001] yönünde, borun en kolay difüzyonlaşabildiği açıklanmaktadır. Borun [001] yönünde kolonsal olarak büyümesi konusunda bir fikir ileri sürülmüşse de, bu durumun kuvvetli kolonsallık olmaması durumunda (002) oryantasyonunun daha etkin olarak ortaya çıktığı ve bu görüşün ağırlık kazandığı görülmektedir [25].

Uçtan büyüme mekanizmasına göre, ana malzemenin bileşimine ve işlem şartlarına bağlı olarak, başlangıçta oluşan Fe_2B çekirdeği iğnesel bir şekilde büyümekte ve bor gradyanı boyunca ilerlemektedir. Bu durumda çekirdeğinin ucu etrafında oluşan bölgesel yüksek gerilim alanları ve distorsiyonları, tabakanın kolonsal olarak büyümesini sağlamaktadır. Uçtan büyüme mekanizmasında Şekil 2.3'de görüldüğü gibi, demir-bor reaktivitesinden kaynaklanan tabaka ile matris ara yüzeyindeki kolonsallık 2 noktasında 1 noktaya kıyasla daha yüksektir [23].

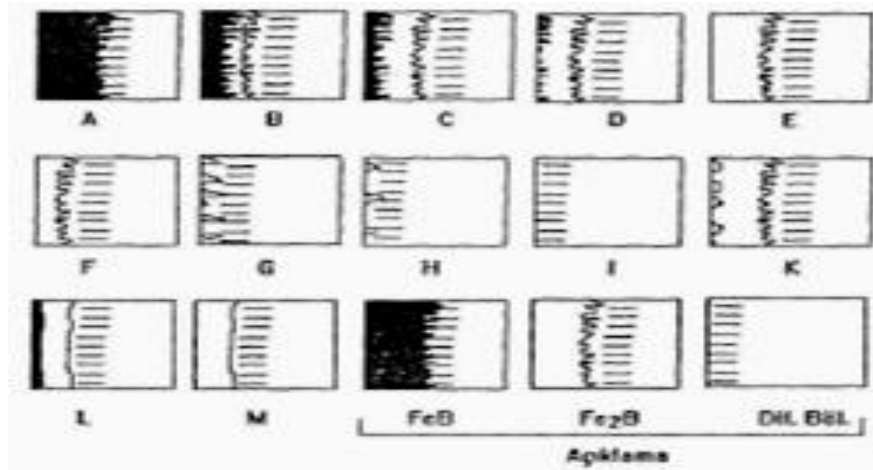


Şekil 2.3. Borür tabakasında FeB ve hemen altında yer alan Fe₂B bölgesinin büyüme mekanizması [22].

2.2.4. Borür Tabakasının Türleri

Çeşitli borlama yöntemleri ile 14 farklı yapıda borür tabakasının elde edilebileceği bildirilmiştir. Şekil 2.4'de bu farklı yapılar şematik olarak gösterilmiştir.

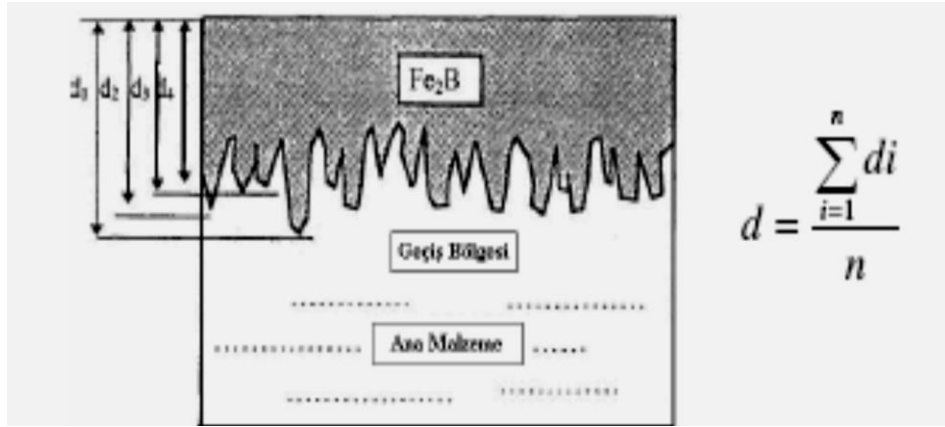
Borür tabakasının yapısı, borlama yöntemine, borlanan malzemenin bileşimine, borlama ortamına ve işlem şartlarına bağlı olmak üzere, örneğin yüksek alaşımli çeliklerde olduğu gibi düz bir şekilde veya zig-zag şekilli parmaklı türde olabilir. İşlem süresi arttıkça parmaklı türdeki borür tabakalarında maksimum ve minimum kalınlıklar arasında fark da artar [22].



Şekil 2.4. Borür tabakasının türleri [25].

2.2.5. Borür Tabakasının Kalınlığının Belirlenmesi

Borür tabakalarının kolonsal ve değişken karakterli bir yapıda olmaları sebebiyle tabaka kalınlıklarının belirlenmesinde güçlükler çıkmakta ve bu nedenle de farklı tanımlamalar yapılmaktadır. Literatürde tabaka kalınlığı, genellikle kolonsal yapının dış yüzeyle karşılaştırılması ve kolonların yüzeye bağlı olarak ortalama mesafelerinin alınması ile hesaplanmaktadır (Şekil 2.5) [23].



Şekil 2.5. Borür tabaka kalınlığının belirlenmesi [23].

2.2.6. Borür Tabakasının Özellikleri

2.2.6.1. Sertlik

Borlanmış tabakanın sertliği demir esaslı malzemelerde, alüminyum oksit sertliği civarında olup, 1800 ile 2100 HV aralığındadır. Bu sertlik değerleri yüksek alaşımli çeliklerde 2400 HV'e kadar çıkmaktadır. Kaynaklarda FeB fazının sertliği 1990–2100 HV, Fe₂B fazının sertliği ise 1800–2000 HV olarak verilmektedir. Ancak yüzey çatlamlarını önlemek amacıyla, bor difüzyonu ile yüzeyde Fe₂B'dan oluşan tek fazlı yapının elde edilmesi tercih edilmektedir [22].

2.2.6.2. Aşınma Dayanımı

Aşınma dayanımı doğrudan doğruya sertlikle ilişkilendirilemez. Ancak borlamayla elde edilen yüksek yüzey sertlikleri ve düşük sürtünme katsayısı genellikle abrasif

aşınmaya, borlanmış ara bileşik yapısı da adhesif aşınmaya karşı direnci artırmaktadır. Bu nedenle borlama, bilinen klasik yüzey sertleştirme yöntemlerine göre aşınma dayanımı açısından büyük üstünlük sağlamaktadır [22].

2.2.6.3. Korozyon Dayanımı

Bazı makine parçalarında korozyon direnci oldukça önemlidir. Borlanmış düşük alaşımlı çeliklerde asitlere karşı yüksek korozyon dayanımı sağlanmıştır. HCl, H₃PO₄, H₂SO₄ gibi asitlere karşı borlamanın oldukça yüksek korozyon direnci sağladığı belirlenmiştir [22].

2.2.6.4. Kalıntı Gerilmeler

Çelikte borlama sonucunda borür tabakası ve tabaka metal ara yüzeyinde büyük kalıntı gerilmeler oluşur. Bunların dağılımı ve şiddeti çeliğin kimyasal bileşimine, borür tabakasını oluşum şartlarına (borlama ortamı, bileşimi ve borlama şartları) ve borlama işlemi sonrası uygulanan ısıtma işlem şartlarına bağlıdır. Kalıntı gerilmeler FeB, Fe₂B ve borlanan malzemenin ısıtma genleşme katsayısının farklı olmasından ve borür tabakası ilk matrisin özgül hacimleri arasındaki farktan kaynaklanır [22].

Yüksek borlama sıcaklıklarında esas metal mukavemetinin düşük olmasıyla, küçük gerilmeler altında plastik deformasyona uğrar. Borlanan malzemeye göre daha büyük özgül hacme sahip olan borür tabakası matrisin deformasyonuna sebep olur. Yapılan çalışmalarda, borür tabakasındaki kalıntı gerilmelerin sadece düşük sıcaklıklarda olduğu görülmüştür [22].

Borür tabakasında en yüksek kalıntı gerilmeler borlama sıcaklığında, fırında soğuma şartlarında meydana gelir. Artan soğuma hızıyla bu gerilmeler düşer. En düşük kalıntı gerilmeler suda su verme sonucunda, su verme sonrası temperleme işleminde de temperleme sıcaklığının artışıyla borür tabakasında ki basma gerilmeleri de artar [22].

2.2.7. Borlama İşleminin Avantaj Ve Dezavantajları

Borlama işleminin avantajları:

Borlamanın diğer sertleştirme yöntemlerinden ayıran en önemli üstünlüğü; yüzey tabakasının çok sert (1450–5000 HV) olmasıdır [23]. Bunun yanında yüksek ergime sıcaklığına, yüksek aşınma ve yüksek sıcaklıkta oksidasyon direncine sahiptir. Demir esaslı malzemelerde kaplama tabakasının sertliği alt kritik sıcaklığa (650 °C) kadar kalıcıdır. Sade karbonlu çelikler üzerinde oluşturulan borür tabakalarının sertliği, diğer geleneksel sertleştirme yöntemleri olan sementasyon ve nitrürasyona göre çok daha yüksektir. Borür tabakasının yüksek sertlik değeri ve düşük sürtünme katsayısı değerlerine sahip olması, aşınma direncinin oldukça yüksek olmasını sağlamaktadır [25,26-28]. Borlama işlemi ile tungsten karbürün, elektrolit sert krom kaplamaların ve sertleştirilmiş takım çeliklerinin sertlik değerlerine ulaşılabilir. Borlanmış çeliklerin sertlik değerlerinin diğer işlemlerle ve sert malzemelerle karşılaştırılması Çizelge 2.6' da verilmiştir [23,29].

Çizelge 2.6. Borlanmış çeliklerin sertlik değerlerinin diğer işlemlerle ve sert malzemelerle karşılaştırılması [23,25-29].

Malzeme	Mikrosertlik (Kg/ mm² veya HV)
Borlanmış yumuşak çelik	1600
Borlanmış AISIH13 kalıp çeliği	1800
Borlanmış AISI A2 çeliği	1900
Su verilmiş çelik	900
Su verilmiş ve temperlenmiş H13 çeliği	540–600
Su verilmiş ve temperlenmiş A2 kalıp	630–700
Yüksek hız çeliği BM42	900–910
Nitrürlenmiş çelik	650–1700
Sementastonlu düşük alaşımlı çelik	650–950
Sert krom kaplama	1000–1200
Sementit karbürler, WC+Co	1160–1820 (30 kg)
Al ₂ O ₃ +ZrO ₂ seramikler	1480 (30 kg)
Al ₂ O ₃ + TiC+ ZrO ₂ seramikler	1730 (30 kg)
Sialon seramikler	1768 (30 kg)
TiN	2000
TiC	3500

Borür tabakasının özellikleri şu şekilde sıralanabilir:

1. Yüksek sıcaklıklarda (550 °C–600 °C) borür tabakasının sertliği korunmaktadır.
2. Borlama, özellikle sertleşebilir birçok çelik gurubuyla kıyaslanabilir yüzey özellikleri elde edilebilmektedir.
3. Borlama işlemi demir esaslı malzemelerin oksidan olmayan seyreltik asitlere karşı korozyon direncini ve bu malzemelerin erozyon direncini arttırmaktadır.
4. Borlanmış yüzeyler çok yüksek sıcaklıklarda (850 °C) orta özellikte oksidasyon direncine ve oldukça yüksek ergimiş metal korozyon direncine sahiptir.
5. Borlanan parça, oksidan ve korozif ortamlarda üstün bir yorulma ömrüne sahiptir.

6. Borlama işlemi, yağlayıcı kullanımının azaltmakta, soğuk birleşme eğilimini ve sürtünme katsayısını düşürmektedir [23,25].

Borlama işleminin avantajları yanında bazı dezavantajları da vardır. Bunlar:

1. Gaz ortamında sementasyon ve plazma nitrürasyon gibi diğer termokimyasal yüzey sertleştirme işlemlerine göre maliyeti daha yüksektir.
2. Borlamaya tabi tutulan malzemelerde bor tabaka kalınlığının %5–20'si oranında boyutsal olarak artış gözlenmektedir. Çok hassas toleranslarla çalışmak gerektiğinde, elmas takımlarla kaplamanın işlenmesi gerekmektedir, zira normal tornalama tabakayı kaldırabilir.
3. Genelde borlanmış alaşımlı çelik parçaların döner temaslı yorulma özellikleri yüksek basınçlı yüzeylerde (2000 N) nitrürasyonla kıyaslandığı zaman, çok zayıftır. Borlamanın bu özelliği sebebiyle, dişli üretiminde bir sınırlama söz konusudur [23,25-29].

2.2.8. Borlama İşleminin Endüstriyel Kullanım Alanları

Borlanmış yüzeyler üç temel aşınma alanında avantaj sağlar.

1. Metalden metale temasın olduğu takımlarda, soğuk kaynağa karşı direnç gerektiren uygulamalarda,
2. Abrasif aşınma durumlarında,
3. Sülfirik asit ve hidroklorik asit gibi oksitleyici olmayan asitlere karşı direncin gerektiği durumlarda [25].

Borlama işlemi çeşitli endüstriyel uygulama alanlarına sahiptir, bunlardan bazıları Çizelge 2.7'de verilmiştir [23].

Çizelge 2.7. Borlama işlemine tabi tutulmuş bazı demir esaslı malzemelerin başlıca uygulama alanları [23,29].

Altık Malzemeler		Uygulama Alanları
AISI	DIN	Kovanlar, Sürgüler, Nözüller, Taşıma
	St37	
1020	C15, Ck 15	Dişli Sürücüler, Pompa Şaftları,
1043	C45	Aşındırıcı Diskler, Pinler
H10	X32CrMoV33	Sıcak Şekillendirme için Alt ve Üst Kalıplar, Besleyiciler
H11	X38CrMoV51	Vanalar, Enjeksiyon Silindirleri, Çıkıcılar
H13	X40CrMoV51	Akışlar, İngot Kalıplan, Sıcak Dövme için Alt ve Üst Kalıplar, Matrisler ve Diskler
4140	42CrMo4	Basma Takım ve Kalıplan, Ekstrüzyon Amaçlı Vidalı Sürücüler, Merdaneler, Ekstrüzyon
302	X12CrNiSS	Vida Yuvaları ve Kovanları
316	X5CrNiMo1810	Plastik ve Kauçuk Endüstrisinde Kullanılan Delinmiş

BÖLÜM 3

AŞINMA

Aşınma, sürtünme halinde bulunan yüzeylerde mekanik etkenlere bağlı olarak meydana gelen malzeme kaybıdır. Birbiriyle temas halindeki iki cisim arasında meydana gelen bağlı hareket ile cisimlerin yüzeylerinin birbirini etkilemesi sonucu aşınma meydana gelir. Bu şekilde, yüzeylerin ilk şekilleri bozulur, parçalar arasındaki boşluklar büyür ve amaçlanan fonksiyon yerine getirilemez [30].

Sürtünerek çalışan bütün makine elemanlarında kaçınılmaz olan ve karmaşık bir sistem özelliği gösteren aşınma, korozyonun ve yorulmanın yanı sıra üçüncü büyük problemdir. Bu nedenle araştırmalar sürtünmeyi ve aşınmayı azaltma ve kontrol etme çalışmaları şeklinde yoğunlaşmıştır. Sürtünmenin ve aşınmanın azaltılmasıyla malzeme kaybı önlenerek boyut hassasiyeti sağlanırken enerji ve malzeme israfı da önlenmiş olur [31].

Çeşitli makine elemanlarının, mühendislik malzemelerinin kullanım ömürlerine büyük oranda etki eden aşınmaya önem verilememekte ve birbiri ile sürtünerek çalışan makine elemanlarının temas yüzeyleri zamanla aşınarak değişikliğe uğramaktadır [32].

Aşınmanın bir tanımı yapılacak olursa;

1. Relatif hareket ve yüzey basıncı altında kalan iki cismin teması sonucu oluşan mekanik enerjinin tesiri ile malzeme yüzeyinden parçacıkların kopması sonucu meydana gelen malzeme yıpranmasıdır [33].

2. Mekanik etkenler ile cisimlerin yüzeyinde zamanla oluşan malzeme kaybıdır [33-36].

Ayrıca aşınma, dış etkiler altında temas yüzeylerinde meydana gelen fiziki değişmelerin sonucu meydana gelmektedir [30]. Mühendislik malzemelerinde görülen yıpranmanın aşınma sayılabilmesi için bazı şartların gerçekleşmesi gerekir.

Bunlar;

1. Mekanik bir etken olması,
2. Sürtünmenin (bağıl hareketin) olması,
3. Yavaş ve devamlı olması,
4. Malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi,
5. İstem dışında meydana gelmesidir.

3.1. AŞINMANIN TEMEL UNSULARI

Aşınmanın gerçekleşmesi için sürtünme olmalıdır. Sürtünen iki cismin temas alanı, görünen temas alanından küçüktür. En hassas işleme yöntemleri ile de olsa işlenen katı malzemelerin yüzeyi hiçbir zaman düz değildir [37]. Çünkü üretim tekniğinde tam olarak pürüzsüz düz bir yüzeyin elde edilmesi imkânsızdır. Yüzeylerin temas etmesi halinde ise yüzeylerdeki pürüzler karşılıklı etkileşir. İlk temas, pürüz tepeleri arasında oluşur. Pürüz tepeleri arasındaki girintiler temas etmezler. Gerçek temas alanı, temasta olan pürüzlerin toplam alanıdır. Yüklemin şekli ve yük temas alanının büyüklüğünü etkiler. Yük arttıkça ilk temas eden pürüzler şekil değişimine uğrar, yani ezilir ve bunun sonucu kısa boyutlu yeni pürüzler birbiri ile temas ederler. Yüklemin temas etmesi ile de pürüz sayısı azalır ve gerçek temas alanı görülen temas alanına yaklaşır [35,37,38]. Yüzey pürüzlüğünün artışı ile aşınma direnci azalır[34]. Temasta olan cisimlere bağıl hareket yaptırabilmek için sisteme bir enerji girer. Bu enerji yük ve hareket şeklindedir. Giriş ile çıkış arasındaki fark, mekanik titreşime, ısı, ses ve sürtünme enerjisine ve aşınmaya dönüşür [34,35,38].

3.1.1. Aşınmayı Etkileyen Faktörler

3.1.1.1. Ana Malzemeye Bağlı Faktörler

1. Malzemenin kristal yapısı,
2. Sertliği,
3. Elastik modülü,
4. Deformasyon özellikleri,
5. Yüzey pürüzlülüğü,
6. Boyutudur.

3.1.1.2. Karşı Malzemeye Bağlı Faktörler Ve Aşındırıcının Etkisi

Ortamın etkisi

1. Sıcaklık
2. Nem
3. Atmosfer

Servis koşulları

1. Basınç
2. Hız
3. Kayma mesafesi

3.2. TRİBOLOJİK SİSTEM

Triboloji, “bir izafi hareket içinde bulunarak birbirlerine etki eden yüzeylerin ve bunlarla ilgili olayların bilimi veya tekniği” olarak tanımlanmaktadır. Triboloji; sürtünme, aşınma ve yağlamanın bilimsel incelenmesini ve tribolojik bilgilerin teknik uygulanmasını içermektedir [31]. İçinde aşınma ve sürtünme olaylarının gerçekleştiği teknik sistemlere tribolojik sistem denilmektedir. Mühendislik malzemelerinin aşınma davranışlarının araştırılmasında mekanik sistemleri bir

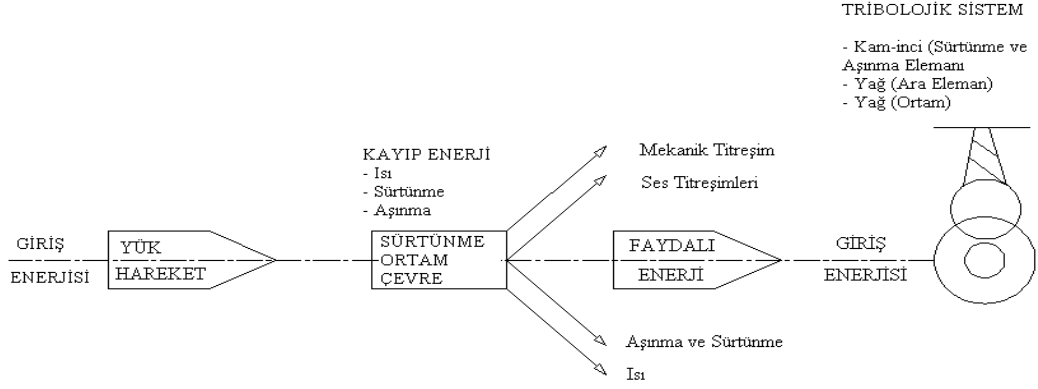
tribolojik sistem olarak dikkate almak gerekir. Yani aşınma olayı bir sistem bütünlüğü içinde ele alınmalıdır [39,40]. Şekil 3.1’de bir tribolojik sisteme giren enerji dağılımı, Şekil 3.2’de ise tribolojik sistemin elemanları görülmektedir.

Tribolojik sistemi oluşturan unsurlar, ana malzeme (aşınan), karşı malzeme (aşındıran), ara malzeme, yük, hareket ve çevreden oluşmaktadır. Bir tribolojik sistem bu unsurların birçoğunu içinde bulundurur. Aşınma çiftini oluşturan ana malzeme ve karşı malzeme aralarında belirli bir ara malzeme varken az veya çok yük altında hareket ettiklerinde aşınma başlar. Ana malzeme; metal, mineral, plastik, kauçuk, ağaç, deri v.s. gibi aşınma karakteristiğine önem verilen katı cisimdir. Aşındıran malzeme ise metal, mineral, plastik, ağaç v.s. şeklinde katı olabileceği gibi sıvı veya gazlarla karışım durumunda da olabilir. Ara malzeme ise yağlar, aşınma parçacıkları v.b. olabildiği gibi bazen hiçbir madde olmayabilir. Endüstride çoğu zaman aşınma parçacıkları yüzeylerden temizlenememektedir. Böyle durumlarda arada yağlayıcı da yoksa teknik de kuru sürtünmeden söz edilir. Çevre çalışma ortamıdır. Yükleme darbeli, darbesiz, sabit, değişken v.s. şeklinde veya bunların birden fazlasının bir arada bulunması halinde olabilmektedir. Hareket ise kayma, yuvarlanma, kaymalı yuvarlanma, darbe gibi biçimlerde olabilir [41,42].

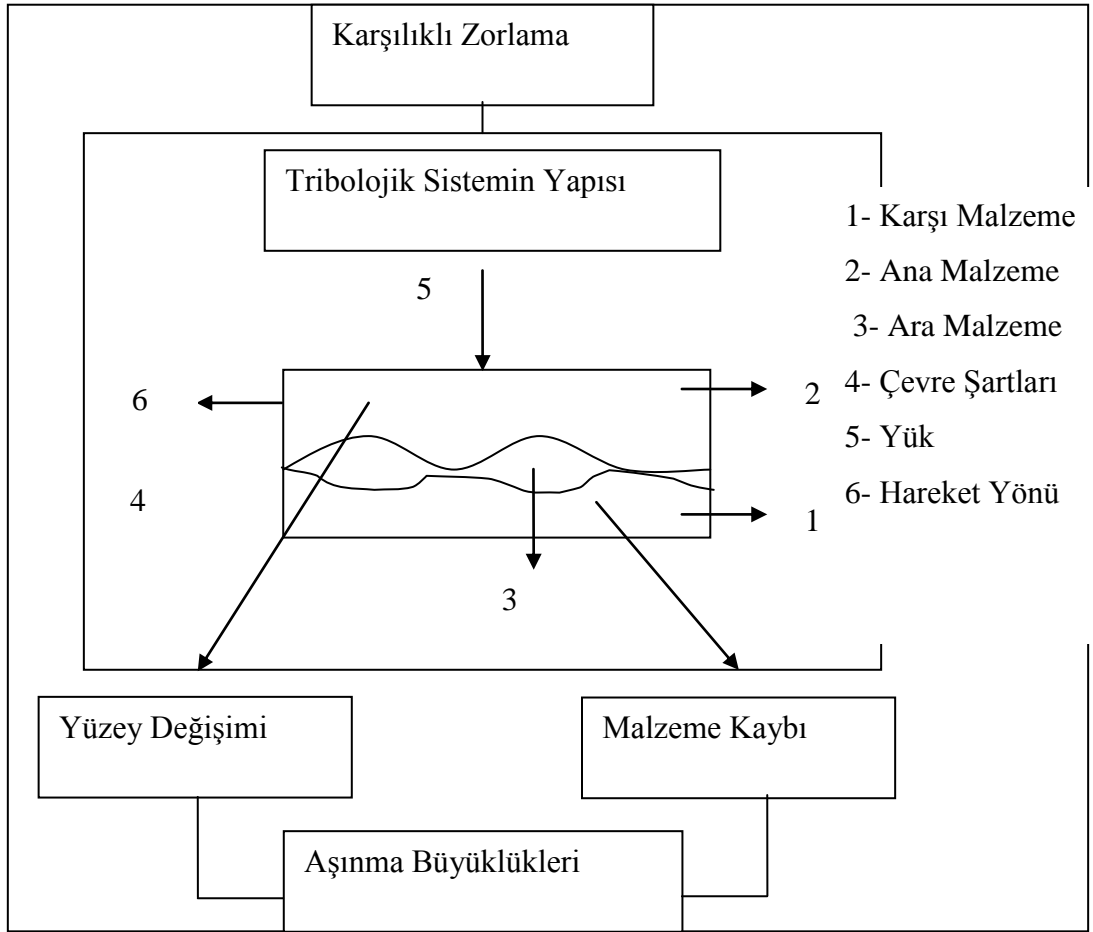
Tribolojik sistemde ortaya çıkan aşınma mekanizmaları da farklıdır. Adhesif aşınma, abrasif aşınma, yorulma aşınması, tribooksidasyon aşınması gibi mekanizmalarla tanımlanan aşınma, tribolojik sistem içerisinde genellikle tek başlarına bulunmazlar ve etkin oranları kesin olarak belirlenemez. Ancak etken olan aşınma mekanizmasına göre önlemler yoğunlaştırılabilir [43,44].

Tribolojik test cihazları, gerçek sistemlerde etkenlerinin analiz edilebilmesinin zorluğu ve ölçümlerin uzun sürelerde ve güçlükle yapılabilmesinden dolayı model sistemlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Araştırmacılar genellikle inceledikleri sistemi dikkate alarak çalışmalarında kullanacakları aşınma test cihazlarını seçerler ve tasarlarlar. Bu seçim veya tasarımlarda, gerçek sistemi oluşturan tribolojik unsurları sağlayabilen ve sonuçları büyük oranda tekrarlayabilen cihazların belirlenmesi önemlidir.

Aşınma test cihazları kısmen standartlaştırılmıştır [43,44]. Ancak standart test cihazlarında her sistemin şartlarını bulmak mümkün olmamaktadır.



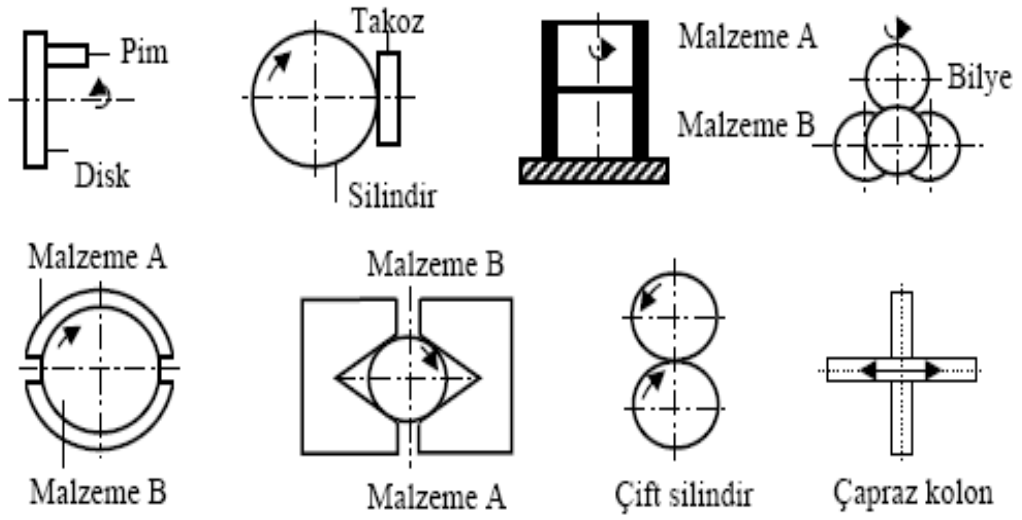
Şekil 3.1 Tribolojik sisteme giren enerji dağılımı [34].



Şekil 3.2 Bir tribolojik sistemin şematik gösterimi [38].

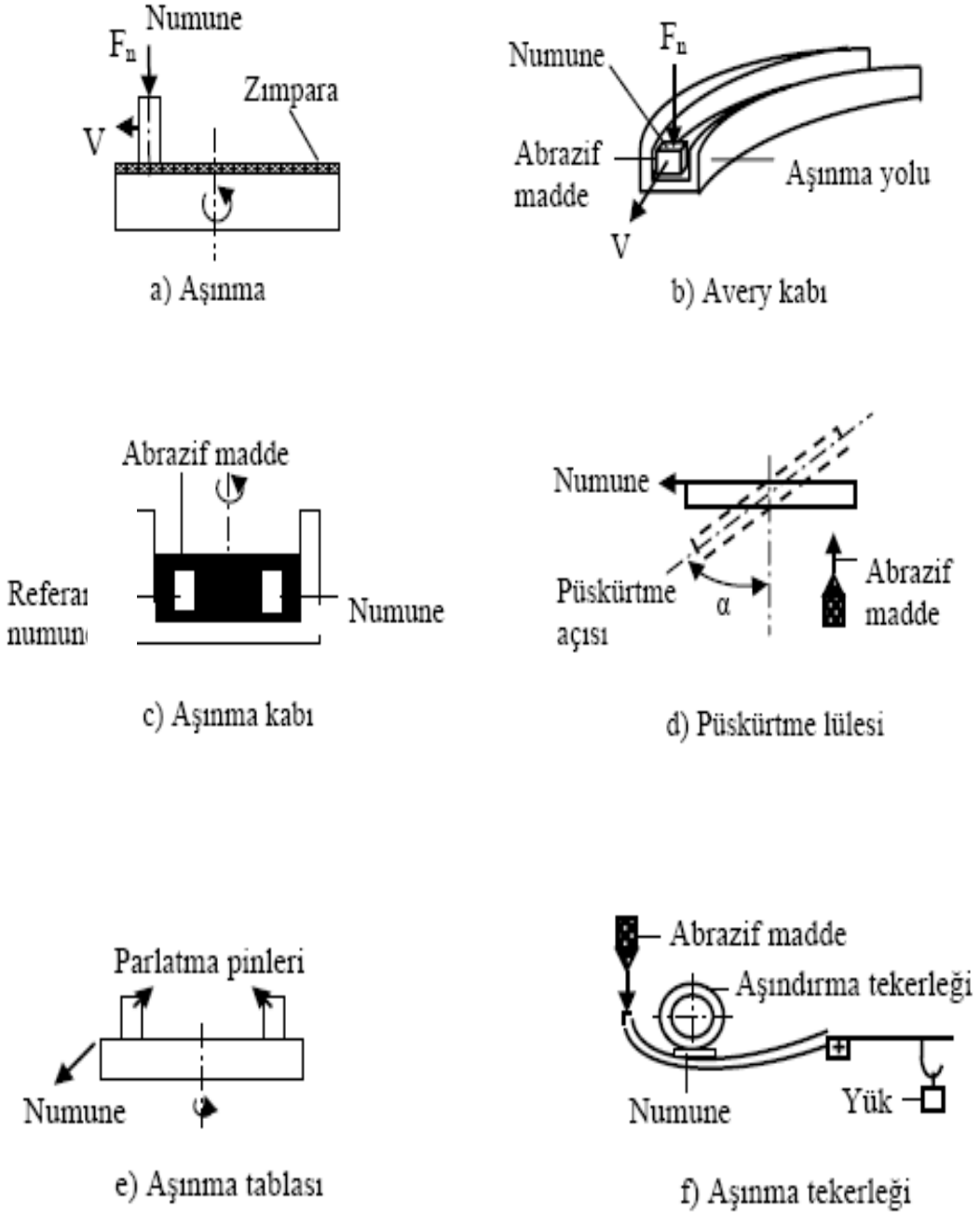
3.3. AŞINMA TEST MODELLERİ

Aşınmanın gerçek sistemlerde belirlenmesinin zorluğu, bir kısmı standartlaştırılan model cihazların geliştirilmesine yol açmıştır. Model cihazlarda tribo sistemi oluşturan unsurların, gerçek sisteme uygun şekilde oluşturulması, sonuçların tekrarlanabilir olması bu cihazlardan beklenen özelliklerdir. Kayma sürtünme ve aşınma test cihazı modelleri tribolojik prensiplere göre Şekil 3.3’de şematik olarak gösterilmiştir [45].



Şekil 3.3 Şematik kayma sürtünmesi ve aşınma test modelleri [45].

Katı, sıvı ve gaz halindeki maddelerin etkisi altında ve yalnız karşı malzeme aşınmasının ölçüldüğü aşınma test cihazı modelleri de şematik olarak Şekil 3.4’de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Şematik abrasif aşınma test modelleri [45].

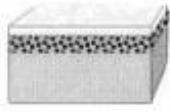
Model aşınma test cihazlarıyla yapılan testlerin amaçları genellikle aşağıdaki gibi sıralanabilir;

1. Sistem elemanlarının verimini, ömrünü, güvenilirliğini, fonksiyonunu, bakım yapıp yapılmaması gerektiğini belirlemek, kalite kontrolünü yapmak,

2. Malzemelerin ve yağlayıcıların tribolojik davranışlarını belirlemek,
3. Malzeme kayıplarını araştırmak,
4. Yeni malzeme veya sürtünme ve aşınma azaltıcı yöntemleri geliştirmek.

3.4 AŞINMA VEYA YÜZEY DEFORMASYONU

Yüzey deformasyonu ve bozulma nedenleri çok geniştir[46]. Önemli tribolojik yüzey bozulmalarının sınıflandırılması Şekil 3.5’de gösterilmiştir.



Yüzey yapısındaki değişiklikler, yüzeyin mekanik özelliğini değiştirir.



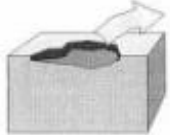
Plastik deformasyon, yorulma ve çatlama başlatabilir.



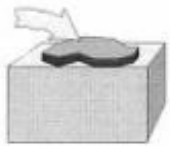
Yüzey çatlamları aşınma değildir fakat tehlikeli yarılmalara öncülük edebilir.



Korozyon mekanik aşınmayı hızlandırabilir.



Aşınma, yüzeyden sürekli malzeme kaybıdır.



Aşınan malzeme tanecikleri karşı yüzeye transferi ile sonuçlanır.

Şekil 3.5 Yüzey aşınma ve bozulmalarının sınıflandırılması [47].

Yüzey aşınma ve bozulmalarının sınıflandırılmasını sırası ile açıklanırsa;

1. Yüzeydeki yapısal değişiklikler, yüzey kaplama veya kristalleşme gibi yüzey değişiklikleri yüzeyin mekanik deformasyonuna yol açabilir. Yüzeydeki yapısal değişiklikler aşınmayı gerektirmez, fakat dış yüzeyin mekanik

özelliklerini değiştirebilir ve aşınma durumunu başlatabilir veya diğer çeşitli yarılmaları oluşturabilir [47].

2. Plastik deformasyon, yüzeyde termal genişleme ve azalmalar veya mekanik gerilmelerin etkisiyle oluşur. Yüzey bölgesinin plastik deformasyonu, dereceli aşındırmayı gerektirmemesine rağmen sonuçta tehlikeli yarılmalara öncülük edebilecek önemli yüzey hasarlarının meydana gelmesi muhtemeldir [47].
3. Yüzey bölgesindeki çatlamlar, aşırı yüzey gerilmeleri, yorulma deformasyonları ya da tekrar eden termal değişikliklerin nedeni olabilir [47].
4. Korozyon ve diğer kimyasal etkiler, başlıca aşınma mekanizmasında yer alabilir. Kimyasal etkiler çatlağın genişlemesini hızlandırır ve yüzey kayıplarının da nedenidir [47].
5. Aşınma veya yüzey hasarı, çeşitli aşınma çeşitleri ile mikroskobik parçacıklar şeklinde yüzeyden sürekli malzeme kayıplarını içerir. Neticede aşınma mekanizması hem mekanik hem de kimyasal olabilir [47].
6. Aşınan malzeme taneleri, karşı yüzeye transfer olur. Yüzeyde sürtünmeden dolayı oluşan aşırı ısınmanın etkisi ile aşınan tozlar toplanarak ara yüzeyde üçüncü yüzey tabakası meydana getirirler bu durum uygun kayma sürtünmesinin de nedenidir [47].

3.5. AŞINMA ÇEŞİTLERİ

Birçok araştırmacı, malzemelerin aşınması üzerine yaptıkları araştırmalar sonucu aşınmayı farklı farklı sınıflandırmışlardır [34,35].

1. Adhesif aşınma
2. Abrasif aşınma
3. Yorulma aşınma
4. Eroziyon aşınması

5. Öğütmeli aşınma (Grinding wear)
6. Oymalı aşınma (Gouging wear)
7. Kazımalı aşınma (Fretting wear)
8. Tribosüblimasyon ve difüzyon aşınması
9. Termal aşınma (Termal etkenler)

En genel olarak bilinenleridir.

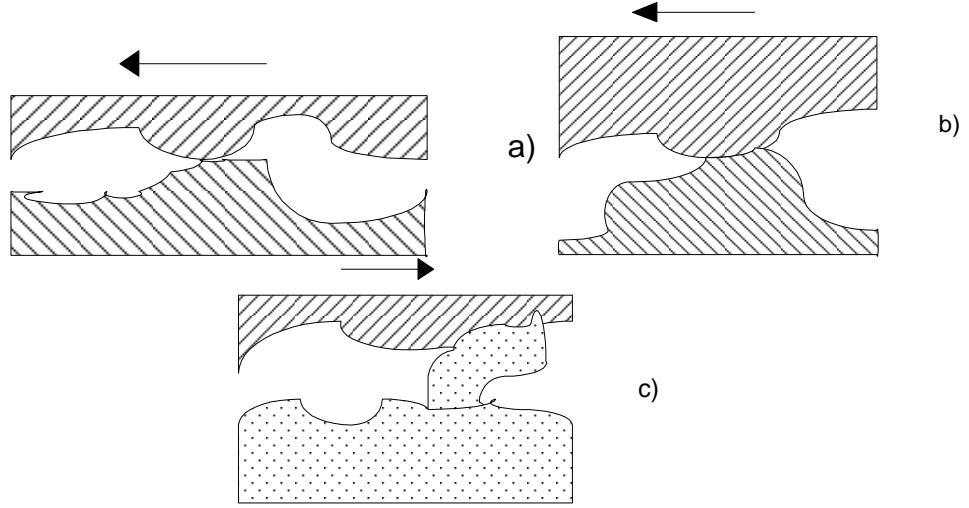
3.5.1. Adhesif Aşınma Mekanizması (Yapışma Aşınması)

Kayma sürtünmesi yapan, metalografik yapıları birbirine benzeyen iki metalin yüzeyleri arasında adhesif çekim kuvveti söz konusudur. Bu kuvvetin oluşması moleküllerin yaklaştırılmasına bağlıdır. Temas halindeki yüzeyler pürüzlerle etkileştiklerinden, metal ağırlığı veya etkiyen bir kuvvet, temasla olan çok küçük pürüz tepelerine çok yüksek basınç olarak etkir. Bu basınç, bu noktalardaki gerilme pürüzlerin akma sınırını aşınca plastik deformasyona, pürüzlerin birbirini çizmesine, yarmasına ve sıvanıp kaynaklanmalarına neden olurlar. Ayrıca pürüzlerin deformasyonu ile oluşan mikro adhesif temas yüzeyi boyunca yayılır. Çiftin karşılıklı hareket etmesi halinde de yüzeyde bulunan absorbe olmuş sıvı veya gaz molekülleri ve oksit tabakaları parçalanarak aşınma çiftinde soğuk kaynaklanmayı oluşturur. Kayma hareketi sırasında bu noktalar koparak yenme ve aşınmaya neden olurlar. Bu tip malzeme kaybı adhesif aşınmayı oluşturur [33,34,36].

Aşınma çiftinin yüzeyleri arasındaki tutma kuvvetleri (adhesif bağ mukavemetleri) eşit büyüklükte ise veya adhesif bağ mukavemeti, büyük ise pürüz kopar ve malzeme kaybına neden olur. Eğer adhesif bağ kuvveti pürüz mukavemetinden küçükse, pürüz kaynak noktasından kopar ve hiç bir malzeme kaybına neden olmaz. Adhesif aşınması sırasında iki sürtünme yüzeyi arasında üçüncü bir cisim meydana gelmektedir. Özellikle adhesif aşınmada kırılan parçalar ara yüzey de serbest kalabileceği gibi metallere birine bağlı kalarak da taşınabilirler. Parçacığın bir yüzeyden diğer yüzeye taşınmasına metal transferi denir [34,35,38].

Adhesif aşınma sırasındaki oksitlenme olayını, korozif aşınma karıştırmamak gerekir. Yukarıda bahsedilen parçalanma malzeme moleküllerinin direk temasa geçmelerine imkân verir. Bunun neticesinde de bölgesel kaynak bağları oluşur (soğuk kaynaklanma). Bu sırada eğer izafi hareket de varsa yüzeydeki sıcaklık yükselir ve ergime noktasına kadar ulaşabilir. Böylece kaynaklanma yerinden veya metal yüzeyinden bir miktar parça kopar. Bu metalik parçacıklar, ara yüzeyde serbest parçacıklar halinde kalabilecekleri gibi metallere birine bağlı şekilde de bulunabilirler. Her iki durumda da malzeme kaybı (aşınma) meydana gelmekle beraber, ikinci durumda malzemelerin birinden diğerine malzeme transferi söz konusudur [48].

Kristalografik olarak benzer kafes yapılı malzemelerde adhesif aşınma mekanizmasını açıklanabilmesine rağmen farklı yapıdaki (mineral malzemeler gibi) malzemeler arasındaki aşınma, adhezyonla başlamaz. Bu gibi malzemelerde Şekil 3.6' da görüldüğü gibi yüksek gerilme ve basıncın etkisiyle pürüzler birbirine geçerek plastik şekil değiştirir. İzafi hareket başladığında zayıf olan malzemenin pürüzleri kopar ve serbest tanecikler meydana gelir. Bu oluşum Şekil 3.6'da gösterilmektedir. Eğer sıcaklık yükselir ve ısıl difüzyon artışı bölgesel kaynak bağları meydana gelir, difüzyon az ise kaynama olmayacağından kırılan parçacıklar serbest hale geçerler.



Şekil 3.6 Adhesif aşınmanın meydana gelişinin şematik olarak gösterimi [37,38]. a) iki çıkıntının buluşması ve bağ oluşturması b) bağın koparak bir yüzden diğerine malzeme transferinin oluşumu c) uzunmuş olan çıkıntının diğer yüzeydeki çıkıntıyla etkileşimi sonucunda da yüzeyde kırıntı oluşumu.

3.5.2. Abrasif Aşınma Mekanizması

Abrasif aşınma, uygulanan yük ve hareketin etkisiyle, sürtünen iki cisimden daha sert olanının, pürüzleri veya taneleri vasıtasıyla diğerini çizerek üzerinden mikro talaş kaldırması olayıdır. Bu tarif, katı/katı, katı/mineral, katı/sıvı gibi birçok sürtünme elemanlarında meydana gelen abrasif aşınmayı kapsar.

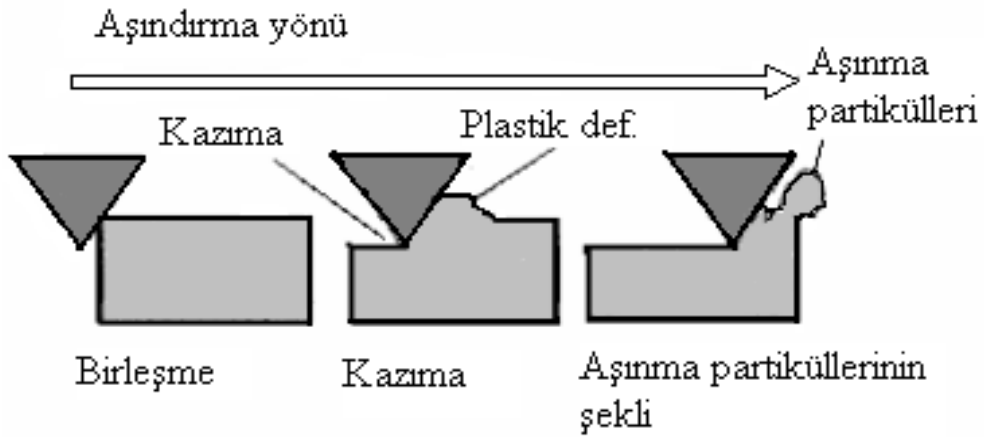
Sürtünen cisimlerin, direkt olarak karşılıklı etkileşimleri sonunda meydana gelen abrasif aşınma, “ İki Cisimli Abrasif Aşınma”dır. Eğer ara yüzeyde sürtünme elemanlarını çizerek tahrip eden sert tanecikler de bulunuyorsa bu tür aşınmaya “Üç Cisimli Aşınma” denir. Bu tanecikler ara yüzeye dışarıdan girebilecekleri gibi aşınma enkazları da olabilirler [49,50].

Genellikle aşınma mekanizmaları, metal/metal sürtünmelerinde iki cisimli abrasif veya adhesif olarak başlayıp üç cisimli abrasif olarak devam eder. Üçüncü cisim olarak ortaya çıkan toz, mineral taneleri, çizilme sonunda serbest hale gelen mikro talaşlar ve parçalanmış oksit parçacıkları olabilir. Üçüncü cisim abrasif aşınma, aşınmayı hızlandırır. Bir sistem içinde yüksek hızlı parçacıkların akışı, erozyon olarak bilinen abrasif aşınmanın özel şeklini ortaya çıkarır [38,50]. Khruschov ve

Babichev, aşındırıcı tanelerle temas eden yüzeyde iki prosesin meydana geldiğini teşhis etmişlerdir [38].

1. Basıncın etkisiyle plastik şekil değiştirme sonucu çiziklerin oluşması (Metal kalkmadan, yüzeyin plastik şekil değiştirmesi),
2. Mikro talaş şeklinde metal parçacıkların ayrılması (Yüzeyden mikro talaşların ayrılması).

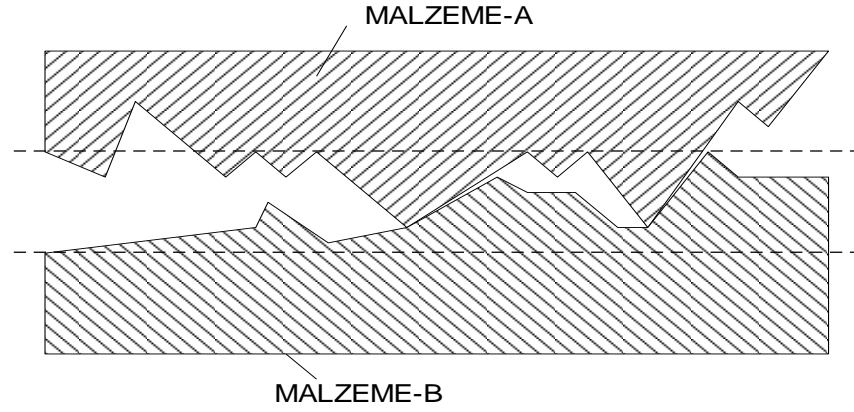
Abrasif aşınma, kesilme, kazınma ve tekrarlanan deformasyon gibi yüzeyi tahrip eden çeşitli mekanizmalar ile meydana gelir. Abrasif aşınma için en önemli şart, sürtünme sırasında, abrasifin sertliğinin aşınma malzemesi sertliğinden daha fazla olması gerekir. Abrasifaşınma şeması Şekil 3.7’de gösterilmektedir [38].



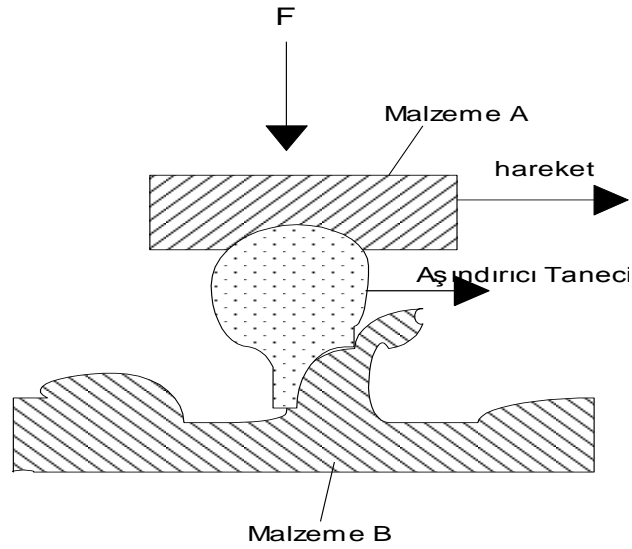
Şekil 3.7. Abrasif aşınma şeması [38].

Şekilde iki cisimli abrasif aşınma gösterilmektedir. Daha sert olan cismin pürüzleri yumuşak olan malzemeyi çizerek mikro talaş kaldırmaktadır [38].

Bu tip aşınmada sert ve keskin parçacık, malzeme yüzeyinden mikron boyutlu talaş kaldırma etkileri gösterirler. Bu aşınma, iki elamanlı ve üç elamanlı olmak üzere ikiye ayrılır. Bu mekanizma Şekil 3.8 ve 3.9’da gösterilmektedir.



Şekil 3.8. İki elemanlı abrasif aşınma [38].



Şekil 3.9. Üç elemanlı abrasif aşınma [38].

İki elemanlı abrasif aşınma, sürtünen elemanların doğrudan birbiriyle etkileşimleri sonucu meydana gelir. Üç elemanlı abrasif aşınmada ise, aşınan ve aşındıran malzeme arasında serbest ara malzeme olması söz konusu olabileceği gibi, aşınma sonucu yüzeylerden ayrılan parçacıkların birer ara malzeme gibi davranmaları da üçüncü eleman olarak görev yapabilir.

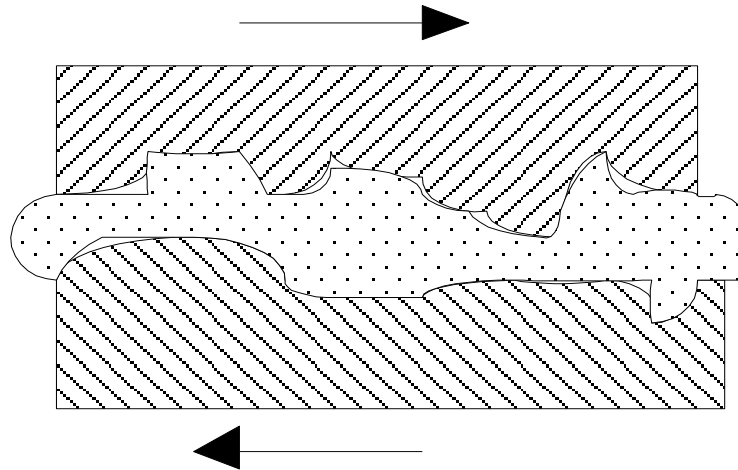
Metal-metal sürtünmelerinde aşınma iki elemanlı abrasif veya adhesif olarak başlayıp, üç elemanlı abrasif olarak devam eder. Bu durumda araya giren toz, mineral taneleri, çizilme sonucu serbest hale geçen mikro taşlar ve parçalanmış oksit parçaları üçüncü elemanı olan ara malzemeyi oluşturabilir. Serbest hale geçen mikro

talaş parçaları, genellikle ana malzemeden daha sert olduklarından dolayı aşınmayı hızlandırır.

3.5.3. Yorulma Aşınması

Mühendislik malzemelerinde yorulma olayı, tekrarlanan zorlanmalar altında ve zamanla meydana gelir. Yorulma aşınması mekanizması malzemenin yüzeyinden başlar. Yüzey bölgesi titreşimli bir zorlanmaya maruz kaldığında veya sürtünme elemanları tekrarlanan gerilimlerle etkileştiklerinde bu gerilmelerin sebep oldukları mikro çatlaklar vasıtasıyla yorulma aşınması dediğimiz pulcuklar şeklinde malzeme ayrılmaları meydana gelir. Bu olay esnasında içyapıda parçalanmalar ve yırtılmalar meydana gelerek yüzeyden kısmi çözümler olur [38].

Maksimum kopma gerilmelerinin bulunduğu yerde plastik deformasyon ve dislokasyon olaylarına bağlı olarak çok küçük boşluklar meydana gelmektedir. Bu boşluklar zamanla yüzeye doğru ilerlemekte, büyümekte ve nihayet yüzeyde küçük çukurlar meydana gelmektedir. Pitting adı verilen bu aşınma tipi, daha çok dişli çarklarda, rulmanlı yataklarda ve kam mekanizmaları gibi yuvarlanma hareketi yapan elemanların yüzeylerinde meydana gelir. Yorulma aşınmasının şematik gösterimi Şekil 3.10'da gösterilmektedir [51].



Şekil 3.10. Yorulma aşınması şeması [38].

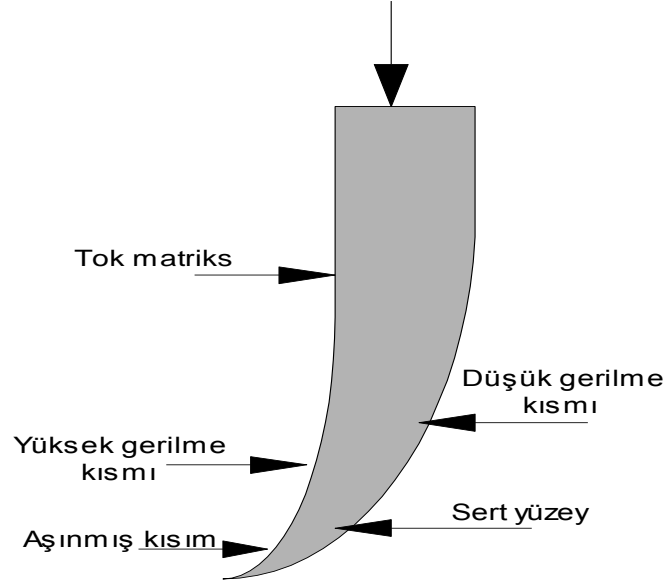
3.5.4. Erozyon Aşınma

Erozyon ortamı ile malzeme yüzeyi arasındaki hızın çok yüksek olması nedeniyle meydana gelen bozunma olayı olarak tarif edilebilir. Gaz veya sıvı ortamında taşınan abrasif tanelerin yüzeye belirli bir açıda çarpması ile oluşan enerji, katı cismin basınç mukavemetini aştığı zaman, cismin yüzeyinde plastik deformasyon meydana gelerek yüzeyde kırılmalara sebep olur ve yüzeyde aşınma meydana gelir. Bu şekilde meydana gelen aşınmaya erozyon aşınması denir. Yumuşak malzemeler erozyon aşınmasına çok elverişlidir. Aşındırıcı parçaların büyüklüğü, hızı, şekli, sertliği ve çarpma açısının değeri erozyon aşınma mekanizmasını etkileyen önemli faktörlerdir. [38].

3.5.5. Öğütmeli Aşınma (Grinding Wear)

Öğütmeli aşınma, yüksek basınçlar altındaki parçacıkların metal yüzeyleri ile düşük hızlarda karşılaşmaları sonucunda, metal yüzeyinde parçacıkların kesilerek veya çok sayıda ufak çizikler açılarak kopartılması ile meydana gelir. Bu yüksek basınç ve düşük hız kombinasyonu, genellikle hafriyat çalışmalarında kullanılan buldozer ve kepçe gibi ağır iş makinelerinin çalışma koşullarında meydana geldiği için, bu araçların kesici uç yüzeylerinde bu hasar türü meydana gelir. Kepçelerde kullanılan kesici ve batıcı uçların, öğütmeli aşınma sonucunda şekil değişimi meydana gelerek körlenme oluşur.

Bu tip aşınmayı engellemek için yapılan girişimlerin başarısızlığa uğraması nedeniyle, malzemenin kontrollü olarak aşındırılması yoluna gidilmeye çalışılmıştır. Kontrollü aşınma ile malzeme kendi kendine bilenererek, körlenme sebebiyle meydana gelen performans düşüklüğü önlenir. Bu mekanizma ile meydana gelen kendi kendine bilenmenin oluşumu, Şekil 3.11'de şematik olarak gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, kesici takım malzemesinin düşük gerilmeli yüzeyine sert metal takviyesi yapılarak aşınma hızı azaltılmıştır. Diğer yüzeyde ise hem malzeme sertliğinin düşük olması, hem de yüksek gerilme etkisinde kalması nedeniyle aşınma hızı, diğer yüzeye göre daha fazladır. Meydana getirilen bu farklı aşınma hızları nedeniyle, malzeme kendi kendine keskinleşir [38].



Şekil 3.11. Bir kesici uçta meydana gelen kendi kendine bilenmesinin oluşum mekanizması [38].

3.5.6. Oymalı Aşınma (Gouging Wear)

Oymalı aşınma, malzeme yüzeyinin çok yüksek gerilmelerdeki çarpma durumlarında, yüzeyden bir parçanın kesilerek veya oyularak kopmasıyla meydana gelir. Bu tip aşınmaya genellikle hafriyat, madencilik, petrol kuyularını delme işlemi ve benzeri koşullarda çalışan malzemelerin kesme ve delme görevi yapan kısımlarında görülür. Bu işlemler sırasında sert abrasif parçacıkların çok yüksek gerilmeler altında malzeme yüzeyine çarpmaları ile yüzeylerde hızlı bir şekilde hasar oluşumu meydana gelir.

Oymalı aşınma diğer aşınma türlerine göre çok daha hızlı olarak geliştiğinden, bu aşınmaya uğrayan parçaların yenileriyle değiştirilerek kullanılması daha ekonomik olmaktadır.

3.5.7. Kazımalı Aşınma (Fretting Wear)

Kazımalı aşınma, karşılaşılan yüzeylerde mikro kaynaşmanın meydana geldiği adhesif aşınmaya bir miktar benzemektedir. Aralarındaki fark ise, şu şekilde açıklanabilir: Adhesif aşınma, birbirleri üzerinde kayan yüzeylerde meydana gelirken, kazımalı

aşınma birbirlerine göre hareket etmeyen yüzeylerde meydana gelir. Ancak kazımalı aşınma, çok düşük genellikteki hareketlerin (vibrasyon) meydana geldiği sistemlerde, mikro kaynak oluşmasıyla meydana gelir.

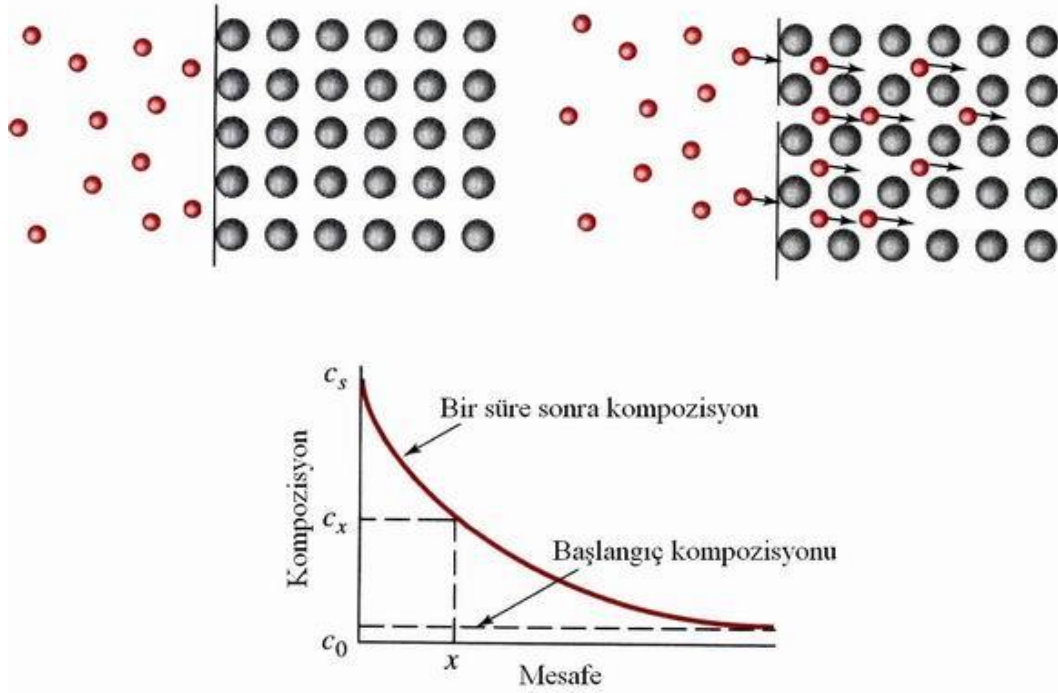
Kazımalı aşınma vibrasyonlu ortamlarda çalışan somun, perçin gibi bağlantı elemanlarıyla gelişmiş sistemlerde, otomobil şaftlarının birleşme noktalarında ve yataklarda en yaygın olarak kullanılan hasar oluşum mekanizmasıdır. Kazımalı aşınma, temas yüzeylerinde yorulma otomobil şaftı gibi parçalarda önemli bir problemdir. Şaftlarda meydana gelen yorulma kırılmalarının sebebinin kazımalı aşınma meydana getirmektedir [38,52].

3.5.8. Tribosüblimasyon Ve Difüzyon Aşınması

Sürtünme ısısı ile yüzey bölgesi sıcaklığının çok yükselmesi halinde ortaya çıkar. Yüksek sıcaklıkta atom veya moleküllerin malzeme içine girmesi difüzyon esasına ve çevreye transferi tribosüblimasyon esasına dayanan aşınma mekanizmalarıdır [52].

Birbirleriyle temas halinde bulunan yüzeyler arasında, sürtünmeden dolayı sıcaklık yükselmesi ile birlikte, temas yüzeyinde bulunan atomların kristal kafes içinde atom yoğunluğu yüksek olan bölgelerden düşük olan bölgelere doğru hareket etmeleriyle meydana gelir Şekil 3.12’de yüzeyler arası malzeme transferi görülmektedir[38].

Sistem çalışırken uygulanan kuvvetle yüzeylerin teması sağlanarak, malzeme yüzeylerinde gerilme yığılmaları ve sıcaklığın artışı ile birlikte temas noktalarında akma ve sürünme başlar. Bunun sonucunda temas noktaları plastik şekil değiştirmeye maruz kalır ve bunun sonucunda da temas alanları büyür.



Şekil 3.12. Yüzeyler arası malzeme transferi [38].

Yüzeyler arası atom alışverişi meydana gelerek mukavemeti düşük olan bir yüzey tabakası meydana gelir. Bu tabaka, sürtünme ve izafi (bağlı) hareketin devam etmesiyle birlikte esas malzeme yüzeyinden koparak malzeme kaybına sebep olur. Bu şekilde meydana gelen aşınmaya difüzyon aşınması denir. Bu aşınma mekanizması fren balatalarında, uzay ve havacılıkta kullanılan araçlar ve takım tezgâhlarında görülür. Demiryollarında kullanılan fren pabuçları ile tekerlek arasındaki sürtünmeden dolayı difüzyon aşınması meydana gelebilir. Sıcaklığın yükselmesi ve yeterli zaman sonunda sürtünme yüzey bölgesinde atom veya moleküllerin çevreye transfer olması ile “tribosüblimasyon aşınması” meydana gelir [38].

3.5.9. Termal Aşınma (Termal Etkenler)

Mekanik ve kimyasal aşınma mekanizmalarının oluşumunu kolaylaştıran ve bu mekanizmalarla eş zamanlı işleyen bir oluşumdur.

Bu mekanizmada sıcaklık etkisi ile atomik hareketler hızlanır. Malzemenin yumuşaması ile atomik aşınma gerçekleşir. Termal şok ve yüksek sıcaklıkta ki oksidasyonda termal aşınmaya sebep olur [53].

3.6 AŞINMAYA ETKİ EDEN FAKTÖRLER

Yapılan çeşitli çalışmalar ile aşınmaya etki eden faktörler belirlenmiştir. Ancak aralarındaki ilişki tam olarak tespit edilememiştir. Aşınmaya etki eden değişkenler ise şunlardır.

3.6.1 Tribolojik Sistemlerin Elemanlarına Bağlı Faktörler

1. Esas sürtünme elemanına bağlı olanlar:

- Malzemenin Cinsi
- Kimyasal Bileşimi
- Mikroyapısı
- Hacimsel ve Yüzeysel Sertliği
- Elastiklik Modülü
- Akma ve Kırılma Özellikleri
- Yüzeyin Pürüzlülük Durumu
- Şekli ve Boyutları
- Soğuk Şekillendirme Durumu
- Gördüğü Isıl İşlem

2. Karşı elemana bağlı olanlar:

- Aşındırıcı Tane Büyüklüğü
- Tane Şekli
- Tane Dağılımı

3. Ortama bağlı olanlar:

- Nem
- Sıcaklık

Farklı yüksek basınç ve çalışma hızlarında yürütülen deneyler neticesinde yüzey basıncının artması ile aşınmanın hızlandığı aynı yükte çalışma hızının artması ile

aşınmanın da arttığı tespit edilmiştir. Basınç artışına paralel olarak çalışma hızının da artması aşınmayı hızlandırmaktadır. Ayrıca sürtünmeyi artıran yük aşınmanın artmasına neden olmaktadır [49,51].

Sürtünme enerjisinin ısıya dönüşmesi ile gerçek temas alanının sıcaklığı artar. Artan sıcaklığın etkisi ile sürtünen yüzeylerde bölgesel ergimeler olur ve yüzeylerden küçük parçacıklar koparak aşınmayı hızlandırır. Sürtünme ve aşınma sonucu meydana gelen yapı dönüşümleri de ısıl çatlamalara ve sürtünme esnasında parçacıkların koparak aşınmanın artmasına sebep olur. Bu nedenle katı cisimlerin aşınmasında sürtünen yüzeylerin sıcaklığı çok önemlidir [49,51].

Metal-metal sürtünme aşınmasında aşınma miktarı, zamana ve kayma yoluna bağlı olarak belirtilir. Aşınma miktarları aşınan parçanın şekil ve ağırlık değişimine ait sayısal bir büyüklük olup aşınma (olay) ve aşınma miktarı (sonuç) olarak birbirinden ayırt edilmesi gerekir. Buna göre aşınma miktarı parçanın ağırlık kaybı ve hacimsel aşınma veya sürtünme yüzeyinin yükseklik kaybı olarak ifade edilir [33,38].

BÖLÜM 4

AISI 8640 VE GS 60 ÇELİKLERİ

4.1. AISI 8640 ÇELİĞİ

AISI 8640 bir ıslah çeliğidir. Islah çelikleri, kimyasal bileşimleri özellikle karbon miktarı bakımından, sertleştirilmeye elverişli olan ve ıslah işlemi sonunda belirli bir çekme dayanımında yüksek tokluk özelliği gösteren, alaşımlı ve alaşımsız makine imalat çelikleridir. Islah işlemi, çelik parçaya yüksek tokluk özelliğinin kazandırılacağı önce bir sertleştirme ve arkasından menevişleme işlemlerinin bütünü olarak tarif edilir. Islah çelikleri, ıslah işlemi sonunda kazandırdıkları üstün mekanik özelliklerden dolayı, çeşitli makine ve motor parçaları, dövme parçaları, somun, cıvata ve saplamalar, krank milleri, akslar, kumanda ve tahrik parçaları, piston kolları, çeşitli miller, dişliler ve şaft imalatı başta olmak üzere makine-imalat parçalarının önemli kısmını oluştururlar [54,55].

Uygun ıslah çeliğinin seçimi ve doğru ıslah işleminin uygulanması çok dikkat ve tecrübe gerektiren bir hadisedir. Islah işleminin iyi sonuç vermesi (istenilen sertlik ve tokluk değerlerine ulaşılması), kullanılan çeliğin içyapı temizliğiyle yakından ilgilidir. İçyapı temizliği, sıvı çeliğin bünyesinde çözülmüş halde bulunan emprütelerden (hidrojen, oksijen, azot gibi) arındırılması ve oksit, sülfür inklüzyonlarından temizlenmesi ile ilgilidir [55].

8640 alaşımlı çeliği, İkinci Dünya Savaşı sırasında geliştirilen özelçelik alaşımıdır. 8640 çelik parçası o zamanda krom sıkıntısı nedeniyle geliştirilmiştir. 4630 çelik tipinin krom içeriğinin yaklaşık yarısı nikel ile değiştirilmiştir. Bilim adamları nikel ve krom kombinasyonunun mükemmel tokluk ve aşınma direncine sahip bir çelik olduğunu keşfetmişlerdir. 8640 alaşımlı çeliği yaygın olarak uçak parçaları ve savaş araç gereçlerinde bazı diğer ürünlerde zamanla kullanılmıştır [55].

8640 çeliğinin ana alaşım elementlerini krom, nikel ve molibden oluşturmaktadır. 8640 çelik sertlik ve sertleşebilirlik derecesi ile tanınır. En yaygın ürünleri arasında çubuk, kütük, döküm ve dövme vardır. Pervane milleri ve şaftların yapımında da genellikle 8640 çeliği kullanılmaktadır [55].

Çizelge 4.1. AISI 8640 çeliğinin kimyasal analizi (%) [56].

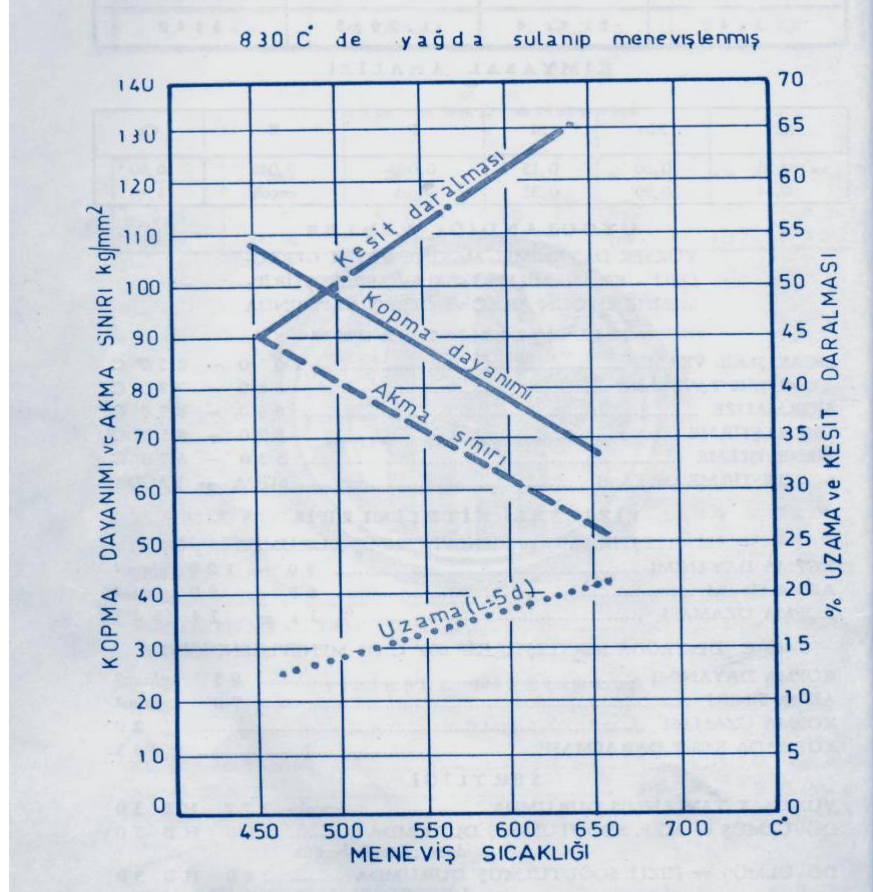
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
0,35	0,70	0,15	-	-	0,40	0,40	0,15
0,44	1	0,35	0,40 max.	0,40 max.	0,60	0,70	0,25

Çizelge 4.2. AISI 8640 çeliğinin ısıtım işlem durumu [56].

Sıcak Şekil Verme	850 °C - 1100 °C
Yumuşatma Tavlama	830 °C - 870 °C Fırında
Normalize	880 °C - 930 °C Havada
Sertleştirme	830 °C – 860 °C
Sertleştirme Ortamı	Yağda

Çizelge 4.3. AISI 8640 çeliğinin fiziksel nitelikleri [56].

Tavlama Durumu	854 °C'de Suda Sertleştirilip, 649 °C'de Menevişlenmiş	Normalize Edilmiş Durumda
Kopma Dayanımı	103 kg/mm ²	79 kg/mm ²
Akma Sınırı	92 kg/mm ²	60 kg/mm ²
Kopma Uzaması	% 19 (5d ⁰)	% 20 (5d ⁰)
Kopma Kesit Daralması	% 43	% 41,5
Sertliği	321 HB	222 HB



Şekil 4.1 AISI 8640 çeliğinin menevişi [56].

4.2. GS 60 ÇELİKLERİ

Dökme çelikler grubuna giren GS 60 çeliği genelde, dökümden sonra talaş kaldırma dışında başka bir biçimlendirme işlemi görmeyen ve bileşiminde %0,43'den az karbon bulunan demir karbon alaşımlarıdır. Alaşımsız dökme çelikler, sade karbonlu malzemeden dökülmüş çeliklerdir. Sade karbonlu çeliklerin bileşiminde karbondan başka silisyum, manganez, fosfor, kükürt ile arıtma gibi işlemler sonucu bileşimde çok az da olsa kalan alüminyum, bakır vb. elementler bulunabilir. Dökme çelikler döküm sanayi, diğer sanayi dallarının temel üretim sektörü olup mamulleri motor, makine ve hizmet üreten, sanayileşmenin ve kalkınmanın temelini oluşturur [54].

Çizelge 4.4. GS 60 çeliğinin fiziksel nitelikleri [54].

Kısa Gösterilişi		Kalınlık	Oda Sıcaklığındaki Mekanik Özellikleri			
			Çekme Deneyi			Darbe Deneyi
Ad	Numara	t (mm)	Akma Sınırı (N/mm ²) (En Az)	Kopma Dayanımı (N/mm ²)	Kopma Uzaması (%)	Darbe Direnci (J)
Gs 60	1,0558	t ≤ 30	300	650-750	15	27
		30 < t ≤ 100	300	520-670	18	31

Çizelge 4.5. GS 60 çeliğinin ısı işleme durumu [54,56].

Normalize	880 °C - 960 °C Havada
Ön Isıtma	150 °C – 300 °C
İşlem Sonrası Gerilim Giderme	≥ 650 °C
Pasolar Arası Sıcaklık	≤ 350 °C

4.2.1. Dökme Çelikler

4.2.1.1. Dökme Çeliklerin Tanıtılması

Dökme çelikler, dökümden sonra talaş kaldırma dışında başka bir biçimlendirme işlemi görmeyen ve bileşiminde %2' den az karbon bulunan demir karbon alaşımlarıdır.

Dökme çeliklerin makine yapımında kullanımı, dökme demirler ve dövme çelikler kadar yaygın değildir.

Bunun nedenleri şöyle sıralanabilir:

1. Çeliklerin ergime sıcaklığı yüksek olduğundan (1500-1600 °C) güçlü ergitme ocakları (endüksiyon, ark ocakları) ve yüksek sıcaklığa dayanıklı kalıp malzemeleri gerektirir. Bazı durumlarda kalıp kumu parça yüzeyine yapıştığından, iyi bir yüzey kalitesi elde etmek için parçanın tümüyle işlenmesi gerekebilir.
2. Metalürjik temizlik (dokusu ve mikro yapısı) dökme demirlerden daha önemli olup kimyasal bileşimin de daha dar sınırlar içinde kontrol edilmesi gereklidir.
3. Döküm sonrasında malzeme kaba taneli (widmannsaetten) iç yapısına sahip olup yeterli tokluk elde edebilmek için ek bir ısıl işlem yapılması zorunludur.
4. Çeliğin akıcılığı ve kalıbı doldurma kabiliyeti düşüktür. Kendini çekme % 2-3 gibi yüksek seviyelerde olduğundan, çekme boşluklarının oluşmaması için özel tedbirler almak gerekir (Besleyici ve soğutucu konmalı.).

Dökme çeliklerin tercih edilmesinin nedenleri:

1. Dökme demirlerin dayanım ile süneklik özelliklerinin yetersiz kaldığı,
2. Parçaların döküm yöntemiyle üretiminin daha ekonomik olduğu (çok büyük parçalar ve karmaşık biçimler),
3. Dökülen parçanın kaynakla birleştirilmesinin gerekli olduğu,
4. Seçilen çeliğin plastik şekil vermeye uygun olmadığı durumlarda tercih edilir.

4.2.1.2. Dökme Çeliğin Çeşitleri ve Kimyasal Bileşimi

Dökme çelik (çelik döküm) demir-karbon alaşımıdır. Dökme çeliğin özelliklerine en çok bileşiminde bulunan karbon etki eder. Karbon miktarına göre, dökme çeliğin özelliklerinde büyük değişiklikler görülür. Dökme çeliğin çeşitleri aşağıdaki gibidir.

1. Alaşimsız Dökme Çelikler

Alaşimsız dökme çelikler, sade karbonlu malzemedan dökülmüş çeliklerdir. Sade karbonlu çeliklerin bileşiminde karbondan başka silisyum, manganez, fosfor, kükürt

ile arıtma gibi işlemler sonucu bileşimde çok az da olsa kalan alüminyum, bakır vb. elementler bulunabilir. Dökme çeliklerin kimyasal bileşimi Çizelge 4.6'da görülmektedir.

Çizelge 4.6. Dökme çeliklerin kimyasal bileşimi (%) [54].

Elementin Adı	% Miktarı
Karbon (C)	0,25-1,7 (2,0)
Manganez (Mn)	0,50-1,00
Silisyum (Si)	0,20-0,80
Fosfor (P)	0,05 en çok
Kükürt (S)	0,06 en çok

2. Alaşımli Dökme Çelikler

Alaşımli dökme çelikler, alaşımli çelik malzemedan dökülmüş çeliklerdir.

Alaşımli çelikler, bileşiminde sade karbonlu çeliklerde (alaşımli çelikler) belirtilen oranları aşan ve özel maksatla içerisinde diğeri alaşım elementlerinden bir veya birden çoğı bulunan çeliklerdir. Alaşımli çelikler, bileşimindeki alaşım elementinin toplamına göre aşağıdaki gibi olur.

Az alaşımli dökme çelikler: Bileşimindeki alaşım elementlerinin toplamı % 5'i (bazı kaynaklarda % 8'i) geçmeyen çelikler.

Yüksek alaşımli dökme çelikler: Bileşimindeki alaşım elementlerinin toplamı % 5'i (bazı kaynaklarda % 8'i) geçen çeliklerdir.

BÖLÜM 5

KOROZYON

5.1. KOROZYON NEDİR?

Korozyon, metal ve metalik alaşımların kimyasal ya da elektrokimyasal olarak termodinamik bakımdan doğada kararlı olduğu bileşiklerine dönüşme isteğidir. Metal ve alaşımların çevre ortamıyla etkileşerek fazla enerjisini dışarı vermesi, entropisini azaltması ve doğadaki kararlı bileşiğine dönüşmesi şeklinde gerçekleşen bir olaylar zinciridir [57]. Korozyon olayı kendi içerisinde 2 sınıfta incelenebilir. Bunlar;

5.1.1. Kimyasal Korozyon

Malzemelerin çevreyle etkileşime girerek doğrudan reaksiyon oluşturmasıdır. En önemli örneği metalin oksitlenmesi (paslanması) olayıdır. Oksitlenme özellikle yüksek sıcaklıklarda meydana gelir ve malzemeyi hasara uğrattığı için genelde istenmeyen bir durumdur [57].

5.1.2. Elektrokimyasal Korozyon

Metal ve alaşımlarının sıvı ortamlar içindeki korozyonudur. Elektrokimyasal korozyonun meydana gelebilmesi için elektrik akımının iletilebileceği bir elektrolit ortamının bulunması gerekir. Ortamdaki çevre asit, baz ve tuzların sudaki çözeltileridir. Örneğin, bir metal elektrot kendi tuzunun sulu çözeltisine daldırıldığında atomların son yörüngesindeki elektronlar serbest hale geçer, bunun sonucunda;

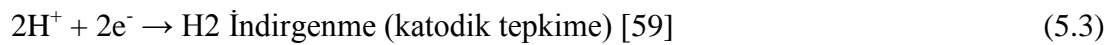


Yüklü metal iyonu meydana gelir [58].

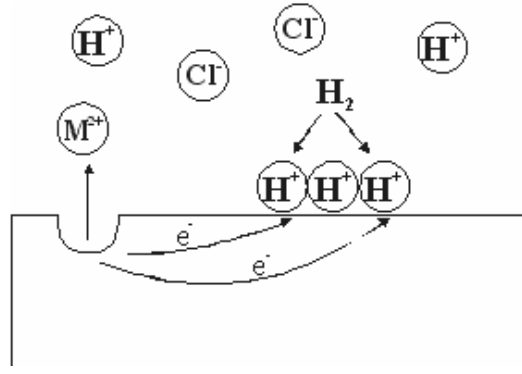
Korozyon tepkimeleri, çoğu metallerin termodinamik kararsızlığı sonucu (Au, Pt, Ir ve Pd gibi soy metaller dışında) veya dış akımların etkisiyle yürür. Metal korozyonu ister anodik ister katodik tepkime ile denetlensin, çoğu hallerde korozyon hızı, yük aktarım basamağı ile sınırlanır. Metal iyonları oluştuğu zaman elektrik devresi tamamlanarak sürekli bir akım yolu sağlanmış olur [58].

Sıvı ortamda elektron alışverişi ile gerçekleşen oksidasyon (elektron verme) ve redüksiyon (elektron alma) reaksiyonlarına elektrokimyasal reaksiyonlar denir. Atmosferde, su içinde, toprak altında oluşan korozyon reaksiyonları bu tip reaksiyonlara örnek teşkil eder. Atmosferde ve toprak altındaki metallerin yüzeyinde de değişik kalınlıkta su filmi vardır. Su içinde hava ve onun bileşeni olan O₂ gazı belli oranda çözüldüğünden O₂ gazı metal yüzeyinde redüklenerek yani elektron alarak iyonik hale dönüşür. Metal de elektronlarını Oksijen'e vererek oksitlenirse katı halden sulu iyon hale dönüşerek kimyasal olarak değişikliğe uğrar. Sulu ortam-metal ara yüzeyinde metalin kimyasal şeklini değiştirmesine korozyon denir [59].

Sulu çözelti kimyasında korozyon elektrokimyasal tepkimelerle gerçekleşir. Bu tepkimelerde anotta metal yükseltgenir, katot da ise çözeltideki reaktif indirgenir [59].

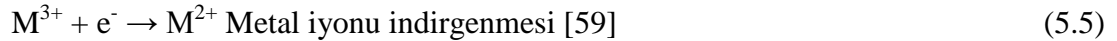
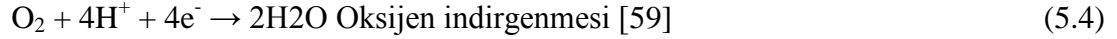


Bu tepkimeler metal yüzeyinde aynı anda ve aynı hızda gerçekleşirler. Yani korozyon sırasında anottaki yükseltgenme hızı katottaki indirgenme hızına eşittir. Şekil 5.1'de HCl ortamında metalin korozyonu sırasında gerçekleşen elektrokimyasal olayların şematik gösterimi görülmektedir [54].



Şekil 5.1. HCl ortamında metalin korozyonu sırasında gerçekleşen elektrokimyasal olaylar [59].

Metal yüzeyinden ayrılan metal atomu iyonuna dönüşürken iki elektronunu bırakır. Bu elektronlar hidrojen iyonlarının indirgenme sırasında kullanılırlar. Metal atomunun elektron vererek metal iyonuna dönüşmesi anodik tepkime olarak adlandırılır. Katodik tepkime ise hidrojen oluşumu reaksiyonudur [59]. Katodik tepkimelere başka örneklerde verilebilir;



Asidik ortamlarda en genel tepkime hidrojen çıkışıdır. Diğer katodik tepkimeler ise çok seyrek gerçekleşebilir. Bir alaşım korozyona uğradığında içerisindeki her metal kendi iyonlarına dönüşerek çözeltiliye geçeceğinden birden fazla yükseltgenme tepkimesi gerçekleşir. Aynı şekilde eğer HCl çözeltisi içerisinde çözülmüş O_2 bulunuyorsa hem hidrojen çıkışı hem de O_2 indirgenmesi gerçekleşir. Korozyon sırasında yükseltgenme hızı indirgenme hızına eşit olacağından bu tepkimelerden birinin artışı diğerinin de artmasına neden olacaktır. Yani oksijen içeren HCl çözeltisi içermeyenden daha çok korozif olacaktır [59].

5.2. KOROZYON ÇEŞİTLERİ

Mühendislik açısından daha önemli olan bölgesel korozyon 2 ana başlık altında incelenebilir (Çizelge 5.1.). Bunlar;

Makro Korozyon

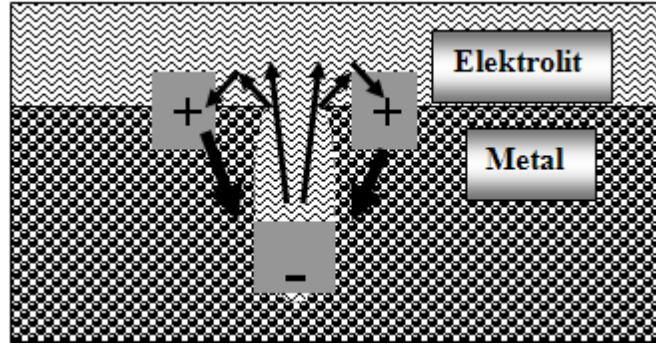
Mikro Korozyon

Çizelge 5.1. Korozyon türleri [60].

Makro korozyon	Mikro korozyon
a) Çukur Korozyon	a) Taneler arası korozyon
b) Galvanik Korozyon	b) Gerilmeli korozyon
c) Aralık Korozyon	c) Yorulmalı Korozyon
d) Seçimli Korozyon	
e) Kabuk altı korozyonu	
f) Fili-form korozyonu	

5.2.1. Çukur Korozyonu

Metal yüzeyinin bazı noktalarında çukur oluşturarak meydana gelen korozyon türüdür. Bu tip korozyon olayında anot ve katot bölgeleri birbirinden kesin şekilde ayrılmıştır. Anot, yüzeyin herhangi bir noktasında açılan çukurun içindeki dar bir bölge, katot ise çukurun çevresindeki çok geniş bir alandır. Korozyon sonucunda çukur gittikçe büyüyerek metalin o noktasından kısa sürede delinmesine neden olur. Bu nedenle çukur tipi korozyon çok tehlikeli bir korozyon türü olarak kabul edilir [61].

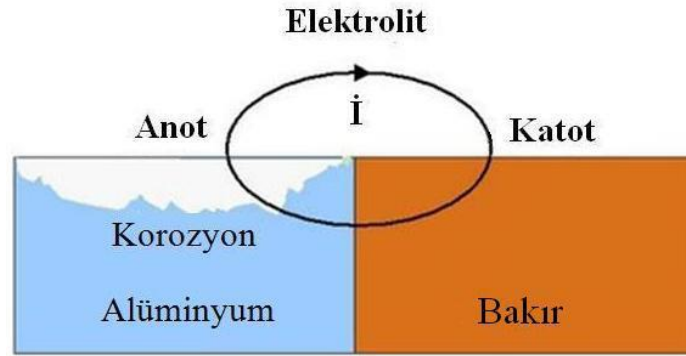


Şekil 5.2. Çukur korozyon işleyiş şeması [60].

Çukurun dibi anot görevi görürken, çukur ağzındaki yüzeyler katot görevi görmektedirler. İyonik akım elektrolitten geçerken, elektronik akım metalden geçer (Şekil 5.2) [60].

5.2.2. Galvanik Korozyon

İki farklı metalin bağlantısından ileri gelen bir korozyon çeşididir. Metallerden daha soy olanı katot, daha aktif olanı ise anot olur (Şekil 5.3). Böylece bir korozyon hücresi meydana gelir. Bu hücrede yalnız anot olan metal korozyona uğrar [61].

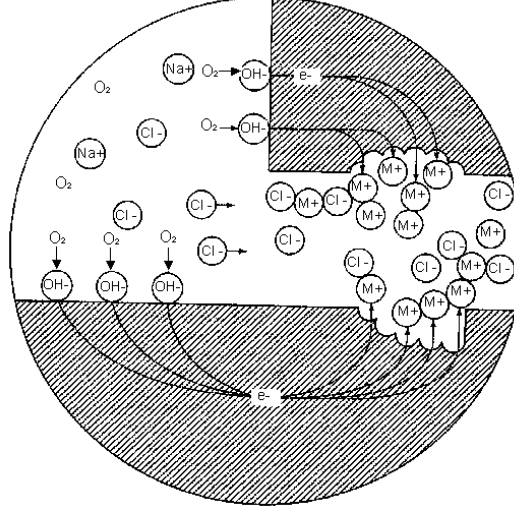


Şekil 5.3. Galvanik korozyonun şematik gösterimi [61].

5.2.3. Çatlak (Aralık) Korozyonu

Metal yüzeyinde bulunan çatlak, aralık veya cep gibi çözeltinin durgun halde kaldığı bölgelere oksijen transferi gerçekleşir. Bunun sonucu olarak bu bölgeler anot, çatlağın çevresindeki metal yüzeyleri katot olur. Çatlak korozyonu yalnız metal

yüzeylerinde bulunan bir çatlakta değil, metal olmayan bir malzeme ile metal yüzeyi arasında da meydana gelebilir (Şekil 5.4) [61].



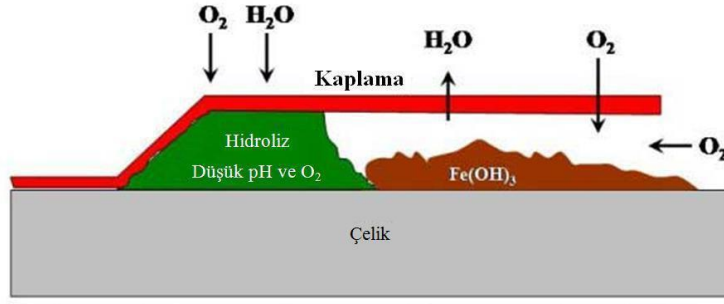
Şekil 5.4. Aralık korozyonunun şematik gösterimi [60].

5.2.4. Kabuk Altı Korozyonu

Metal yüzeyinde korozyon ürünlerinin oluşturduğu veya başka bir nedenle oluşan bir kabuk (birikinti) altında meydana gelen korozyona kabuk altı korozyonu denir. Bu korozyon kabuk altının rutubetli olmasından ve yeteri kadar oksijen alamamasından kaynaklanır. Çünkü kabuk altında sıvı hareketi yoktur. Bu durum çatlak korozyonuna benzer bir ortam oluşturur. Kabuğun altı anot, kabuk çevresi ise katot olur [61].

5.2.5. Fili Form Korozyonu

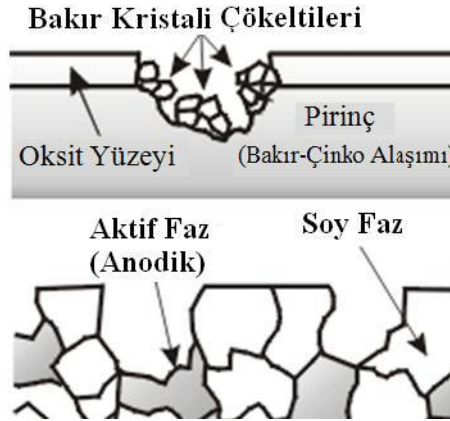
Metallerin yüzeyinde bulunan boya v.b. kaplamaların altında kaplama kalınlığının incelendiği bölgeden başlayarak kaplama altında devam eden bir korozyon türüdür (Şekil 5.5) [61].



Şekil 5.5. Fili form korozyonunun şematik gösterimi [61].

5.2.6. Seçimli Korozyon

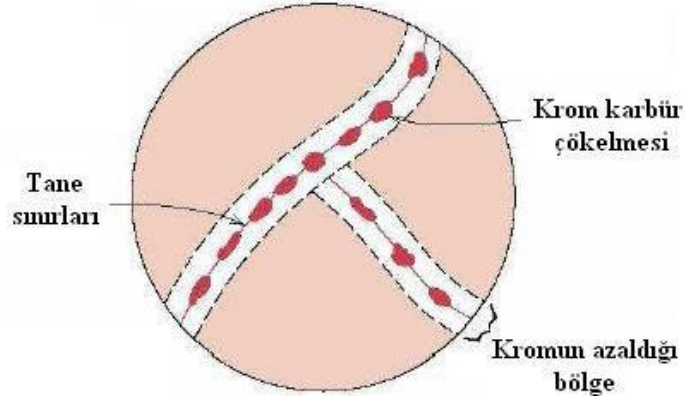
Bir alaşım içerisinde alaşıma katılmayıp serbest kalan elementlerin bir tanesinin korozyona uğrayıp diğer elementin korozyona uğramaması durumudur. Pirinç malzemeler bu korozyon türüne en iyi örnektir (Şekil 5.6) [61].



Şekil 5.6. Seçimli korozyonun şematik gösterimi [61].

5.2.7. Taneler Arası Korozyon

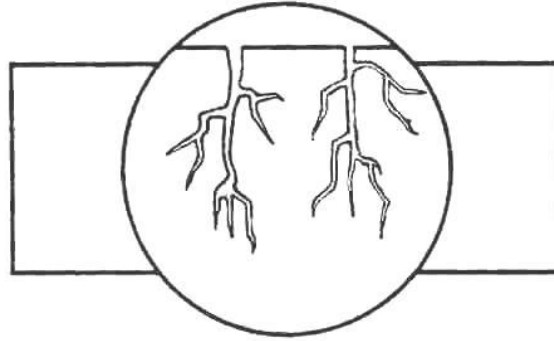
Bir metalin kristal yapısında tanelerin sınır çizgisi boyunca meydana gelen korozyona taneler arası korozyon denir. Taneler arası korozyonun en tipik örneği paslanmaz çeliklerde görülür (Şekil 5.7) [61].



Şekil 5.7. Taneler arası korozyonun meydana geldiği bölge [62].

5.2.8. Gerilmeli Korozyon

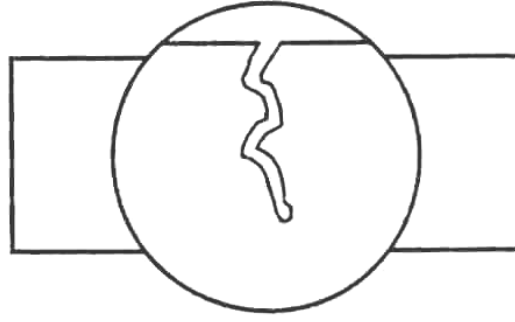
Korozif ortamda bulunan bir metal aynı zamanda statik bir gerilme altında ise, metalin çatlayarak kırılması, korozyonun başlaması için uygun bir ortam oluşur. Normal halde korozyon ürünleri metal yüzeyinde koruyucu bir kabuk oluşturduğu halde, stres altında iken kabuk oluşturamaz. Bunun sonucu olarak korozyon hızla devam ederek metalin o bölgede çatlamasına neden olur (Şekil 5.8) [61].



Şekil 5.8. Gerilmeli korozyonun şematik gösterimi [61].

5.2.9. Yorulmalı Korozyon

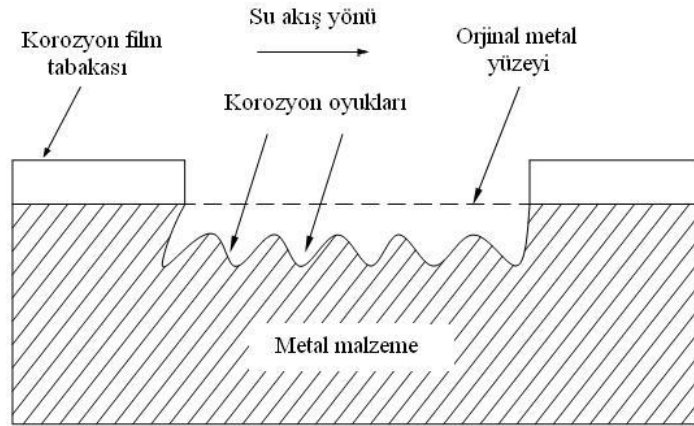
Periyodik olarak yükleme-boşaltma şeklinde etkiyen dinamik bir stres altında bulunan bir metal zamanla yorulur. Yorulmuş halde bulunan metal, normalden daha küçük gerilmelerin etkisiyle çatlayabilir. Yorulma ve korozyonun birlikte etkisi metalin kısa sürede çatlamasına neden olur (Şekil 5.9) [61].



Şekil 5.9. Yorulmalı korozyonun şematik gösterimi [61].

5.2.10. Erozyonlu Korozyon

Korozif çözeltilerin metal yüzeyinden hızla akması halinde, korozyon olayı yanında erozyon da meydana gelir. Bu durum korozyon hızının da artmasına neden olur. Bunun nedeni, oluşan korozyon ürünlerinin akışkan tarafından sürüklenerek götürülmesidir. Erozyonlu korozyon olayı daha çok hareketli akışkanların bulunduğu ekipmanlarda, (borular, dirsekler, valfler vb.) söz konusu olabilir (Şekil 5.10) [61].



Şekil 5.10. Erozyonlu korozyonun şematik gösterimi [61].

5.3. KOROZYON HIZININ ÖLÇÜMÜ

Kimyasal olaylarda korozyon hızı kütle kaybı yöntemiyle, elektrokimyasal olaylarda ise tafel polarizasyon yöntemi, lineer polarizasyon yöntemi, alternatif akım empedans ölçme yöntemi ile ölçülür [58].

5.3.1. Kütle Azalması Yöntemi

Kütle kaybından korozyon hızı belirlenirken çözünmenin homojen olması ve korozyon ürünlerinin ya tamamen çözünür veya uygun bir çözültide çözünerek metal yüzeyinden uzaklaştırılması gerekir [58].

$$\text{Korozyon hızı} = \text{Kütle azalması} / \text{metal yüzey alanı} \times \text{zaman} \quad (5.7)$$

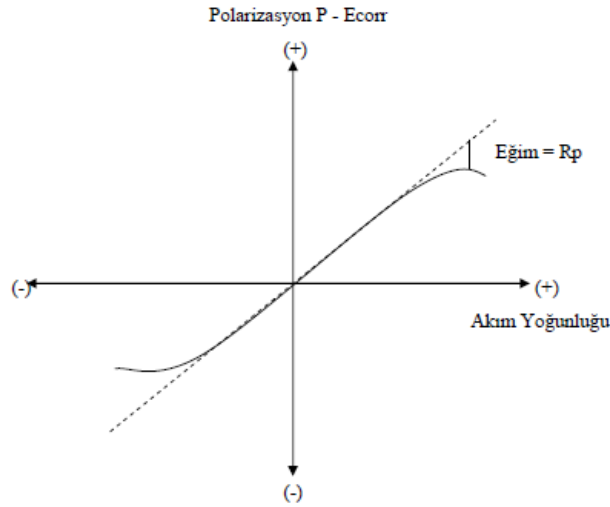
Bu yöntemde korozyon akımı Faraday yasası ile şöyle bulunabilir:

$$I_{\text{corr}} = \Delta m \cdot F \cdot n / \Delta t \cdot M \quad (5.8)$$

Burada Δm kütle kaybını, M metalin molar kütleini, F Faraday sabitini, n söz konusu metalin çözünmeye geçme değerini ve Δt ise zaman aralığını göstermektedir [58].

5.3.2. Linear Polarizasyon Yöntemi

Akım potansiyel eğrisinin korozyon potansiyeli dolayındaki doğrusal kısmının eğiminden polarizasyon direnci bulunup, aşağıda ifade edilmiş Stern-Geary eşitliği kullanılarak korozyon hızı bulunur (Şekil 5.11) [58].



Şekil 5.11. Linear polarizasyon yöntemi ile R_p bulunması [59].

Polarizasyon direnç yöntemiyle korozyon hızı belirlenmesinde akım potansiyel eğrisi I_{corr} ile ağırlık azalması arası ilişki aşağıdaki denklemlerle verilir;

$$I_{corr} = \Delta m \cdot F \cdot n / \Delta t \cdot M_k \quad (5.9)$$

Burada; Δm ağırlık azalması, F Faraday sabiti; n alınan verilen elektron sayısı, M_k metalin atom gramının kütlesi, Δt zaman aralığıdır [59].

$$I_{corr} = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{2,303(\beta_a + \beta_c)} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta E} = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{2,303(\beta_a + \beta_c)} \cdot \frac{1}{R_p} = \frac{B}{R_p} \quad (5.10)$$

I_{corr} korozyon akımını, β_a ve β_c sırasıyla anodik ve katodiktafel sabitlerini, R_p polarizasyon direncini gösterir [59].

5.3.3. Alternatif Akım Empedans Ölçme Yöntemi

Yöntemin esası, metal/çözelti ara yüzeyinde oluşan çift tabakanın uygulanan alternatif akım ile empedansının ölçülmesine dayanmaktadır. Yöntemin uygulanmasında, çift tabaka kapasitesi ve metal yüzeyi ile çözeltinin iç kısmı arasındaki dirençlerden oluşan bir “elektronik eşdeğer devre” tasarlanarak polarizasyon direnci belirlenmeye çalışılmıştır. Bulunan polarizasyon direnci (R_p) değeri Stern-Geary eşitliğinde yerine konularak, korozyon hızı hesaplanır [58].

5.3.4. Tafel Elektro-Polarizasyon Yöntemi

Çözelti ortamında malzeme belirli bir potansiyele sahiptir. Akım çekmezken oluşan bu potansiyel değeri açık devre potansiyeli olarak adlandırılır. Açık devre potansiyeli daha negatif veya daha pozitif yapılan taramalar bu bölgede yüzeyde meydana gelen reaksiyonlar hakkında bilgi verir. Bu davranışlar incelenerek deneye tabii tutulan malzemenin elektrokimyasal özellikleri ile ilgili sonuca varırız.

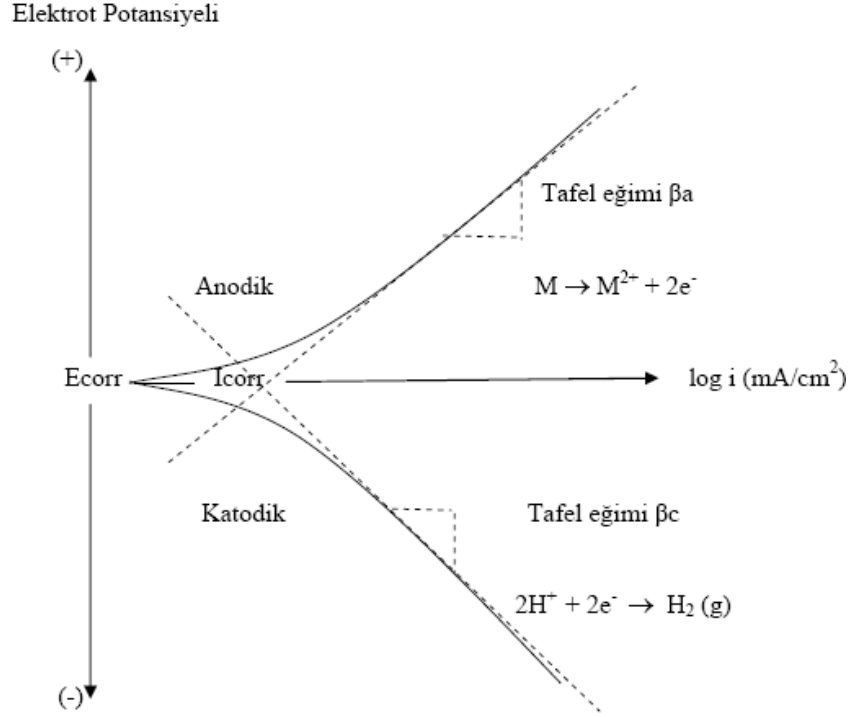
Elde edilen bu katodik ve anodik eğriler vasıtasıyla β -Anodik ve β -Katodik eğriler ile E_{corr} potansiyel korozyon ve I_{corr} akım korozyon değerleri tespit edilir. Tespit

edilen bu veriler vasıtasıyla malzemenin belirlenen ortamda belirlenen koşullarda elektrokimyasal özellikleri ve korozyon hakkında yorum yapılır [57].

Korozyon metali ve çözelti arasında anodik ve katodik reaksiyonların oluşup dengeye gelmesiyle oluşur. Anodik reaksiyonda açığa çıkan elektron katodik reaksiyonda indirgenmede kullanılır. Bu yolla korozyon hızının belirlenmesi, korozyona uğrayan metalin anot ve katot yüzeyleri arasındaki akımı ölçülerek yapılır. Bu yöntemle korozyon olaylarında anot ve katot yüzeyleri birbirinden ayrılmadığından, iki kutup arasındaki akım dolaylı olarak ölçülür. Bu ölçüm korozyon hızı olarak kabul edilir [57].

Bu yöntemde de akım-potansiyel ölçümü vardır. Akım ya da potansiyelden biri denetimli olarak uygulanır ve diğerinin değişimi kayıt edilir. Sabit potansiyelde akım değerlerinin ölçülmesi potansiyostatik yöntem, değiştirilen potansiyellere karşılık gelen akım şiddetlerinin ölçülmesi ise potansiyodinamik yöntemdir [57].

Korozyona uğrayan metal için anodik ve katodiktifel eğrileri deneysel olarak belirlenir. Bu eğrileri çizmek için, çalışılacak potansiyel aralığı korozyon hızının belirleneceği yöntemle seçilir. Şekil 5.12'de görülen E - log i polarizasyon eğrisi elde edilir. Şekilden de görüldüğü gibi uygulanan dış akım belli bir değere ulaştıktan sonra polarizasyon eğrisinde lineer bölge oluşuyor. Uygulanan dış akımın lineer olarak değiştirdiği bu bölgelere "Tafel Bölgesi" denir. Korozyon potansiyelinden başlayarak katodik ya da anodik yönde çizilen yarı-logaritmik akım-potansiyel eğrileri tafel eğimleri olarak bilinir (Şekil 5.12). Bu eğrilerin ekstra polarizasyonu alındığında kesim noktadaki korozyon potansiyeli, buna karşılık gelen akım ise korozyon akımıdır. Korozyon akımı korozyon hızı hakkında bilgi verir [57]. Tafel doğrusunun eğimi deneysel olarak elde edilip korozyon hızı bulunur. Yani tafel ekstra polarizasyonu yönteminde anodik ve katodiktifel eğrilerinin çizgisel olan kısımları azaltılıp kesim noktalarından korozyon hızı ve korozyon potansiyeli bulunur [57].



Şekil 5.12. Anodik ve katodik polarizasyon eğrileri [57].

Anodik ve katodik reaksiyonlar elektrot yüzeyinde aynı anda gerçekleştiğinden elektrot potansiyeli karma bir potansiyel değere yani E_{corr} 'a ulaşır. Buna karşılık gelen akımda I_{corr} korozyon akımı olur [57].

Korozyon hızının elektrokimyasal olarak ölçülmesi sırasında karşılaşılan en büyük sorunlardan biri, korozyon potansiyelindeki akımın ölçülmesidir, çünkü bu potansiyelde dışarıdan bir ölçüm cihazı tarafından kaydedilebilecek herhangi bir akım olmaz. Sonuç olarak, korozyon akımını (I_{corr}) ölçmek için yapılan herhangi bir elektrokimyasal yöntem, korozyon potansiyeli dışındaki potansiyellerdeki akımları ölçerek gerçekleştirilir. Böylece, korozyon potansiyelindeki akım yaklaşık olarak tahmin edilir, daha doğrusu yaklaşık olarak hesaplanabilir. Bu hesaplamalar için çeşitli formüller geliştirilmiştir [58].

Metal çözünmesi akım yoğunluğunu veren eşitlik:

$$I_{anot} = i_0 \exp(\beta \eta nF/RT) \quad (5.11)$$

Bu eşitlik tekrar düzenlendiğinde:

$$\eta_{\text{anot}} = b_{\text{anot}} \log (i_{\text{anot}} / i_0) \text{ eşitliği ortaya çıkar [58].} \quad (5.12)$$

Burada b_{anot} tafel katsayısıdır:

$$b_{\text{anot}} = 2,303 RT / \beta nF (\text{Anot için}) \quad (5.13)$$

Katot söz konusu olduğunda:

$$b_{\text{anot}} \rightarrow b_{\text{katot}} ; i_{\text{anot}} \rightarrow i_{\text{katot}} \text{ olacaktır [58].} \quad (5.14)$$

Katodik ve anodik reaksiyonlar bir korozyon işlemi olarak birleştirildiğinde, metal çözülümünden kaynaklı anodik akım, redüksiyon nedeniyle oluşan eşit katodik akım ile dengelenmelidir [58].

Bu durumda I_{corr} korozyon akımıdır ve sadece tek bir potansiyelde gerçekleşebilir, o da E_{corr} , yani korozyon potansiyelidir. E_{corr} 'un değeri temel bir termodinamik anlama sahip değildir [58].

Korozyon potansiyeli genellikle anodik ve katodik reaksiyonların tafel analizine uygun şartlarda devam ettiği tafel bölgesindedir. Dolayısıyla, hem katodik, hem de anodik reaksiyonların polarizasyon eğrileri korozyon potansiyelinden uzakta potansiyellerde belirlenir. Dış devrede ölçülen akım her zaman $i_{\text{anot}} + i_{\text{katot}}$ toplamıdır ve korozyon potansiyelinde (E_{corr}) sifıra denk gelir. Bu fikirden yola çıkarak, korozyon potansiyeli ölçümü ile korozyon akımı aşağı yukarı belirlenebilir. Bunun için i_0 değişim akım yoğunluğu (exchange current), tafel katsayıları (b_{anot} , b_{katot}), denge potansiyeli (E_e) gibi metal çözünme reaksiyonuna dair veriler, deneyler sonucu bulunmalıdır [58].

$$E_{\text{corr}} = (E_e)_{\text{anot}} + b_{\text{anot}} \log (I_{\text{corr}} / i_0) \quad (5.15)$$

$$I_{\text{corr}} = i_0 \exp [2,303 (E_{\text{corr}} - (E_e)_{\text{anot}}) / b_{\text{anot}}] \quad (5.16)$$

BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. MALZEME VE ÖZELLİKLERİ

Bu çalışmada kullanılan AISI 8640 ve GS 60 çelik numuneler 20 mm çapında ve 100 mm uzunluğunda silindir şeklinde Altan Makine ve Çelik İml. Tic. Ltd. Şit. Çorum fabrikasında üretilmiştir. Deney çalışmalarında kullanılan AISI 8640 ve GS 60 çelik malzemesinin spektro analizi Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2’de verilmiştir. Borlamanın yapılacağı parçalar ASTM G 99 standartlarına uygun olarak, işlenerek, 10 mm çapında ve 40 mm uzunluğunda numuneler silindir şeklinde hazırlanmıştır.

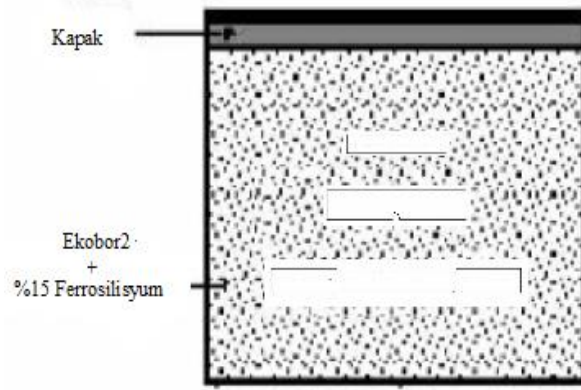
Çizelge 6.1. 8640 çeliğin bileşimi, % ağı.

C	Si	Mn	P	S	Mg
0.407	0.244	0.721	0.024	0.017	0.0025
Cr	Ni	Mo	Cu	V	W
0.52	0.455	0.162	0.327	0.004	0.030

Çizelge 6.2. GS 60 çeliğin bileşimi, % ağı.

C	Si	Mn	P	S	Mg
0.399	0.453	0.545	0.028	0.017	0.0022
Cr	Ni	Mo	Cu	V	W
0.163	0.098	0.020	0.323	0.003	0.003

Borlama metodu olarak kutu borlama yöntemi tercih edilmiştir. Borlama işlemi 1200°C sıcaklık kapasiteli ± 5 °C hassasiyetli mikro işlemci kontrollü, elektrik rezistanslı, dijital göstergeli fırında gerçekleştirilmiştir. Borlama işleminde, paslanmaz çelik kutu içerisine Ekobor2 + %15 Ferrosilisyum karışımı konulmuştur. Numuneleri kutuya aralarında 1'er cm mesafe kalacak şekilde yerleştirildikten sonra üzerleri tamamen bor karışımı ile doldurulmuş ve paslanmaz çelik kutunun kapağı sıkıca kapatılmıştır. Bu şekilde hazırlanan numuneler 850, 900 ve 950 °C sıcaklıklarda 2, 4, 6, 8'er saat borlama işlemine tabi tutulmuştur. Numuneler daha sonra oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır.



Şekil 6.1. Numune kutusunun hazırlanması

6.2. METALOGRAFİK İNCELEMELER

Numuneler öncelikle hassas kesme cihazıyla kesilmiştir. Metalografik inceleme için numuneler alınıp, bu numunelere soğuk gömme işlemi uygulanmıştır.

Mikro yapı incelemelerinde numuneler sırasıyla, 180, 320, 600, 800 ve 1200 meşh zımparalarla aşındırılmıştır. Numuneler 3 μm ' luk Al_2O_3 solüsyon ile parlatılmıştır. Alkol ile temizlenen numuneler, %2 nital (%2 HN_3O_3 + %98 CH_3OH) ile dağlanmış ve tekrar alkol ile yıkanıp kurutulmuştur.

Mikroyapı incelemelerinde Karabük Teknoloji Fakültesinde bulunan bilgisayar donanımına bağlantılı MEIJI marka optik mikroskop kullanılmıştır. Bor tabakası kalınlığı ölçülmüştür. Bor tabakası kalınlığı ölçümü çekilen mikroyapı görüntüleri

üzerine milimetrik ölçüm kâğıdı konularak yapılmıştır. Her görüntüden ortalama 15'er ölçüm yapılmış ve bunların ortalaması alınmıştır. Daha sonra bu değerler mikron metreye çevrilmiştir. Aşınmış yüzeylerin görüntüleri ise optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gerekli büyütmelemlerde görüntülenmişlerdir.

6.3. MİKRO SERTLİK ÖLÇÜMLERİ

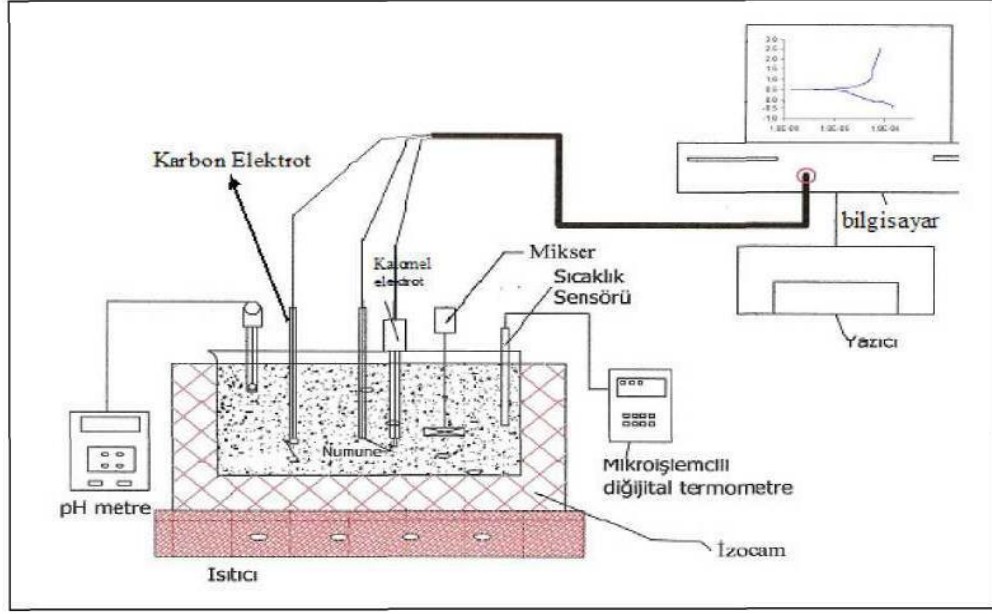
Numunelerin sertlik ölçümleri Karabük Teknoloji Fakültesinde bulunan SHIMADZU marka mikro sertlik cihazında (HMV0,02) yapılmıştır. Ölçümler dıştan içeriye doğru yapılmış olup sertliğin matrise doğru azaldığı görülmüştür. Deneyler Vickers sertlik ölçüm yöntemi kullanılmıştır.

6.4. KOROZYON DENEYİ

Potansiyodinamik korozyon deneyleri, DC105 Korozyon Analizi yazılımına sahip bilgisayar kontrollü Gamry model PC4/300mA potansiyostat/galvonostat cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney hücresi olarak 400ml beher kap ve sıcaklık kontrollü ısıtıcı kullanılmıştır (Şekil 6.2). Numunelerin yüzeyleri %10 metanol ve %90 saf su ile temizlenmiş ve kurutulmuştur. Korozyon deneyleri, oda sıcaklığında, saf su ve %10 HNO₃ korozif ortamında gerçekleştirilmiştir. Deney suresince elektrolit karışımını sağlamak için hücre içerisine mini mikser monte edilmiştir. Statik korozyon düzeneği resmi Şekil 6.3'de verilmiştir. Deney hücresi içerisine, çalışma elektrotu olarak deney numuneleri, karşı elektrot görevini yapan 6mm çapında karbon elektrot ve referans elektrot olarak da doygun kalomel elektrot (SCE) yerleştirilmiştir. Çalışma elektrotu ile karbon elektrot yüzeyleri karşılıklı gelecek şekilde belirli uzaklıkta, referans elektrot ise çalışma elektrotuna olabildiğince yakın yerleştirilmiştir.

Deneyler sırasında elektrolit içine çalışma elektrotunun ve referans elektrotunun daldırılmasından itibaren ikisinin arasındaki korozyon potansiyellerinin mV olarak değişimi 45 dakika süreyle zamana karşı ölçülmüştür. Denge potansiyeline (E_{kor}) ulaştıktan sonra potansiyodinamik polarizasyon eğrileri -1.00'dan 1.00 V'a kadar 1 mV/s tarama aralığında katodikten anodik yöne doğru potansiyeli tarayarak kayıt

edilmiştir. Tüm deneyler, her bir numune çeşidi için en az ikişer defa olmak üzere polarizasyon eğrileri birbirlerini doğrulayınca kadar tekrar edilerek sonuçların daha güvenilir olmasına çalışılmıştır. Tafel eğrilerinden korozyon potansiyeli (E_{kor}), korozyon akım yoğunluğu (I_{kor}) ve korozyon hızı (CR) hesaplanmıştır.



Şekil 6.2. Potansiyostatik yöntemle çalışan statik korozyon deney düzeneği.

Korozyon deney numuneleri iletkenliği sağlayabilmek amacıyla arka yüzeyine 1,5 mm çapında 150 mm uzunluğunda bakır tel lehimlenmiş ve yalnızca elektrolit ile temasta olması istenen yüzeyleri açıkta kalacak şekilde reçine ile kaplanmıştır.



Şekil 6.3. Statik korozyon deney hücresi.

Deney sonrasında numuneler, çözelti içerisinde çıkarılarak saf su ortamında 5 dakika süre ile temizlenmiş ve ardından alkol ile durularak kurutulmuştur.

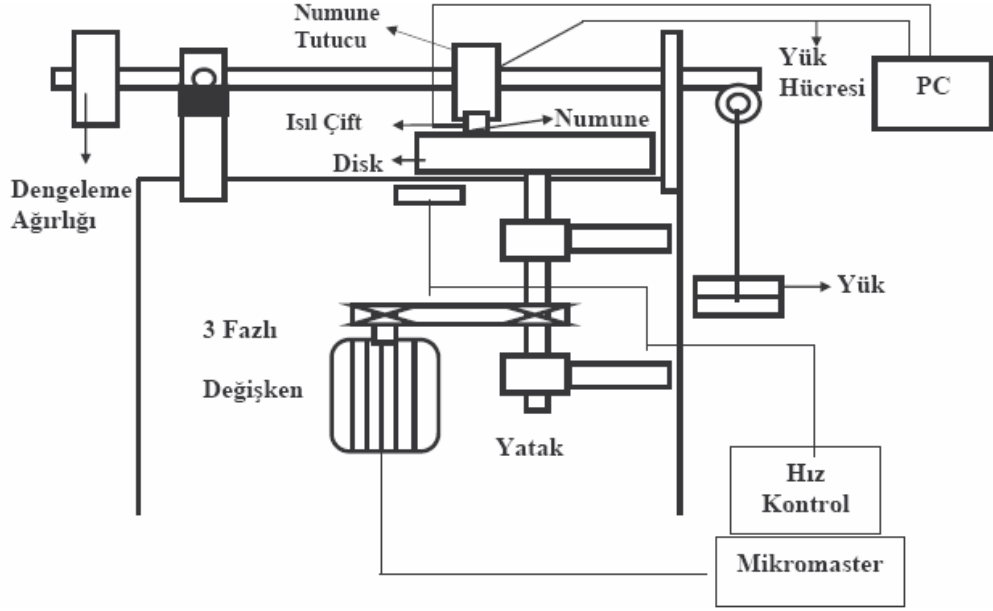
Daldırılmak suretiyle yapılan korozyon deneyleri, oda sıcaklığında, konsantrasyonu %10 olan HNO_3 çözeltisine daldırılarak yapılmıştır. Korozyon deneyleri sırasında belirli zaman aralıklarında çözeltiden çıkarılan numuneler, %90 saf su ve %10 alkol içinde ultrasonik olarak temizlenmiştir.

Ultrasonik temizleme işleminden sonra numuneler 0,1 mg hassasiyete sahip elektronik terazide tartılmıştır. Deney sonuçları, numunelerin birim yüzey alanı başına düşen ağırlık kaybına göre gr/mm^2 biriminde değerlendirilmiştir.

6.5. AŞINMA DENEYİ

Aşınma testleri, pin-on disk aşınma cihazında, oda sıcaklığında, 10 N ve 20 N yük altında 1000 ve 1200 Mesh alüminyum oksit (Al_2O_3) abrasif aşındırıcı üzerinde ve 0,1 m/s sabit kayma hızında yapılmıştır. Aşınma numuneleri, abrasif aşındırıcı zımpara üzerinde, aşınma yönüne dik şekilde hareket ettirilmiş ve böylece numuneler daima yeni zımpara yüzeyine temas ettirilmiştir. Numunelerin kayma mesafesi 10

m'dir. Numuneler aşınma deneyinden önce ve sonra 10^{-4} g hassasiyetinde elektronik terazide tartılmıştır. Aşınma deneyinde kullanılan cihazın şematik görüntüsü Şekil 6.4'de gösterilmiştir.



Şekil 6.4. Aşınma deney cihazının şematik gösterimi [38].

6.6. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ

Aşınmaya etkiyen parametrelerden olan yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 6. 5'de verilen Mitutoyo SJ201 marka profilemetre cihazında hasas ölçümlerle yapılmıştır.



Şekil 6. 5.Mitutoyo SJ201 marka profilemetre cihazı.

6.7. X-IŞINLARI KIRINIM ANALİZİ İNCELEMELERİ

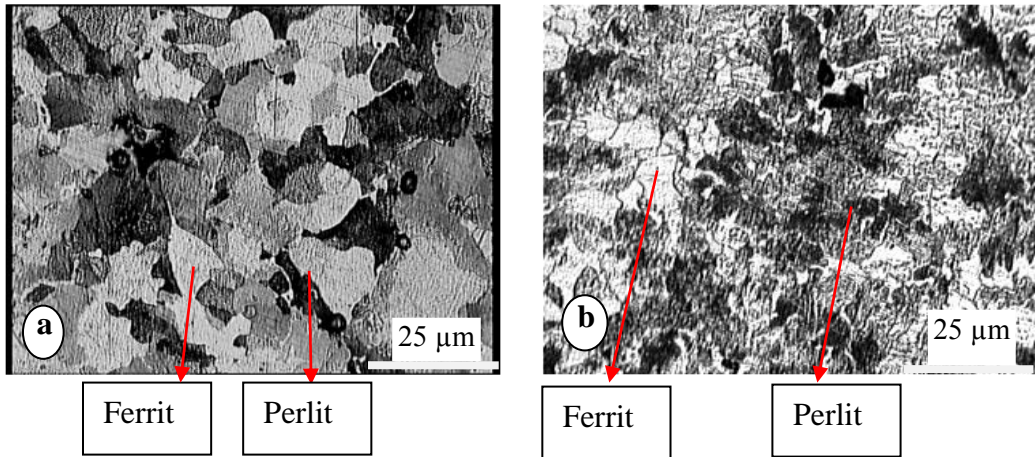
X-Ray analizi için Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Metalurji Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı'ndaki Rigaku D/Max-2200/PC Model XRD Cihazı kullanılmıştır.

BÖLÜM 7

DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA

7.1. MİKROYAPIÇALIŞMALARI

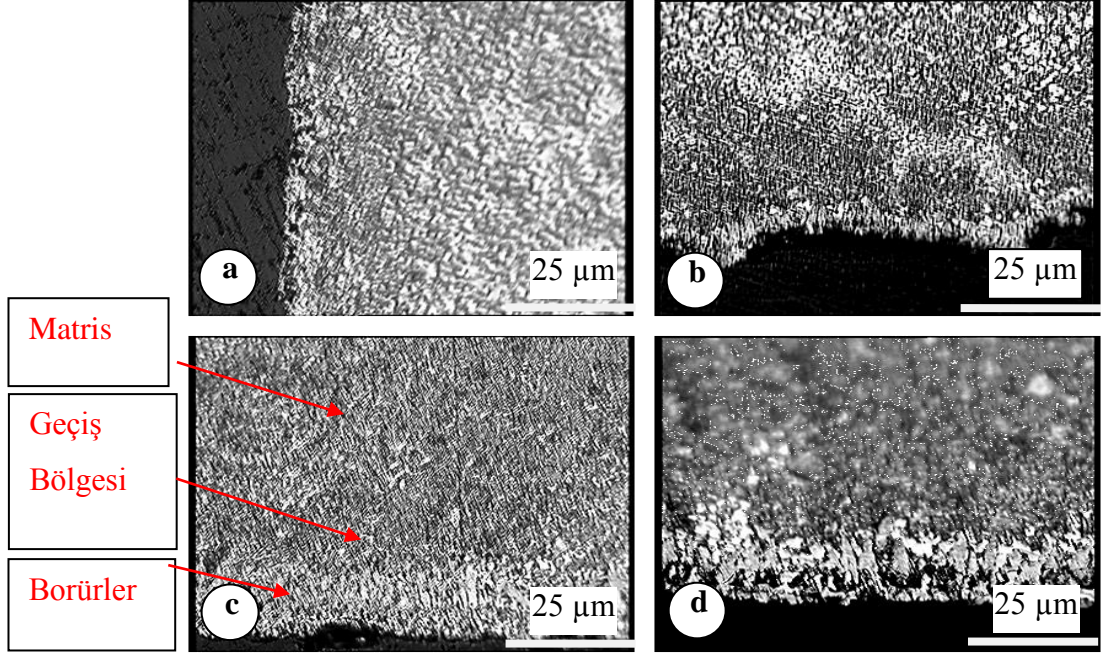
Bu çalışmada numuneler metalografik incelemeler için hazırlanarak %2 nital dağlayıcı ile dağlanarak optik mikroskopta incelenmiştir. İşlemsiz 8640 çelik malzemenin ve işlemsiz GS 60 çelik malzemelerin mikroyapısı Şekil 7.1'de verilmiştir. Şekil 7.1'den görüldüğü gibi 8640 çelik malzemenin mikro yapısı ferritik matris ve perlitten oluşmaktadır. GS 60 çelik malzemenin mikro yapısında ferrit ve perlitten oluşmaktadır.



Şekil 7. 1. Dökümden sonra hiçbir işlem görmemiş a) 8640 çelik malzemesine ait mikroyapılar, b) GS 60 çelik malzemesine ait mikroyapılar.

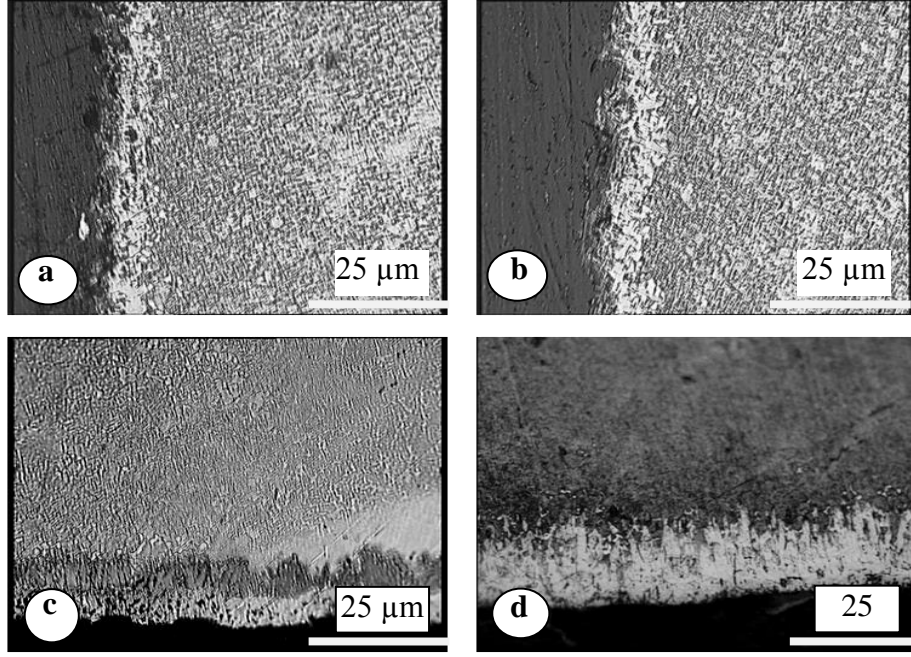
Borlama sonrası yapıdaki değişmelerin incelenmesi için içyapı görüntüleri alınmış ve bu numunelerin içyapı incelemeleri aşağıda sırası ile açıklanmıştır. 850, 900 ve 950 °C sıcaklıklarda 2, 4, 6 ve 8 saat borlanan 8640 çelik numunelere ait mikroyapı görüntüleri Şekil 7.2 - Şekil 7.4'de verilmiştir. Şekillerden borlanmış numunelerin yüzeylerindeki borürlerin düzgün dallı kolonsal bir morfolojiye sahip oldukları

görülmektedir. İşlem süresi ile bor katman kalınlığı arasında bir ilişkinin olduğu gözlenmektedir.

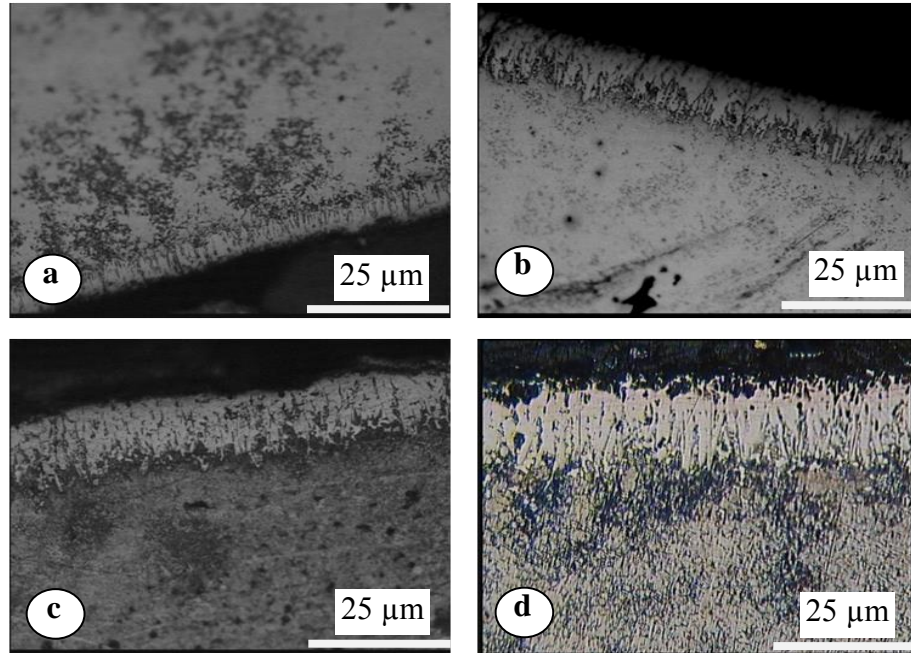


Şekil. 7.2. 850 °C’de a) 2 b) 4 c) 6 ve d) 8 saat borlanan 8640 çelik numunelere ait mikroyapılar.

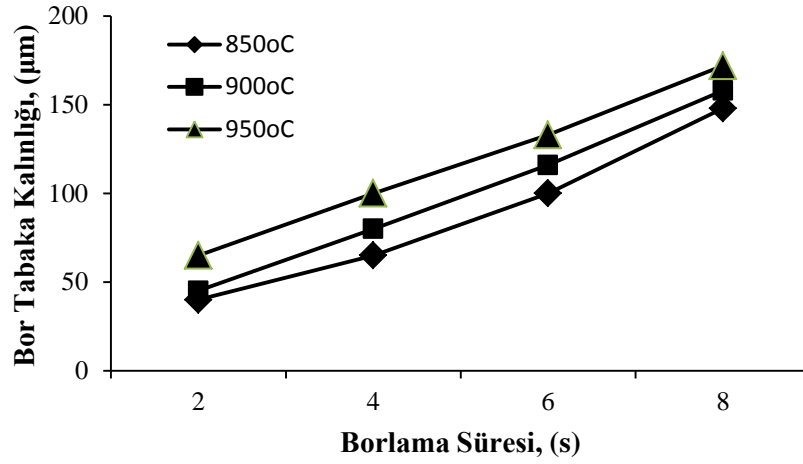
Her üç sıcaklık için de bor tabakasının tarak dişi morfolojide oluştuğu görülmektedir. Bor katmanı kalınlığı borlama süresine ve sıcaklığa bağlı olarak arttığı görülmüştür. Borlama sıcaklığı ve/veya süresinin artmasıyla bor tabaka kalınlığının arttığı Şekil 7.5’de görülmektedir. Bununla birlikte, 8 saatten sonra bor tarak dişi morfolojisi bozularak, ana malzeme içerisine doğru yayıldığı görülmüştür. Borlanmış 8640 çeliğinin ve GS 60 çeliğinin yüzeyinde üç bölge görülmektedir. Bunlar; en dıştaki borürlerden oluşmuş borür katmanı, bor katmanının bitip matrisin başladığı yer olan geçiş bölgesi ve ana matristen oluşmaktadır (Şekil 7.2).



Şekil7.3. 900 °C’de a) 2 b) 4 c) 6 ve d) 8 saat borlanan 8640 çelik numunelere ait mikroyapılar.



Şekil 7.4. 950 °C’de a) 2 b) 4 c) 6 ve d) 8 saat borlanan 8640 çelik numunelere ait mikroyapılar.

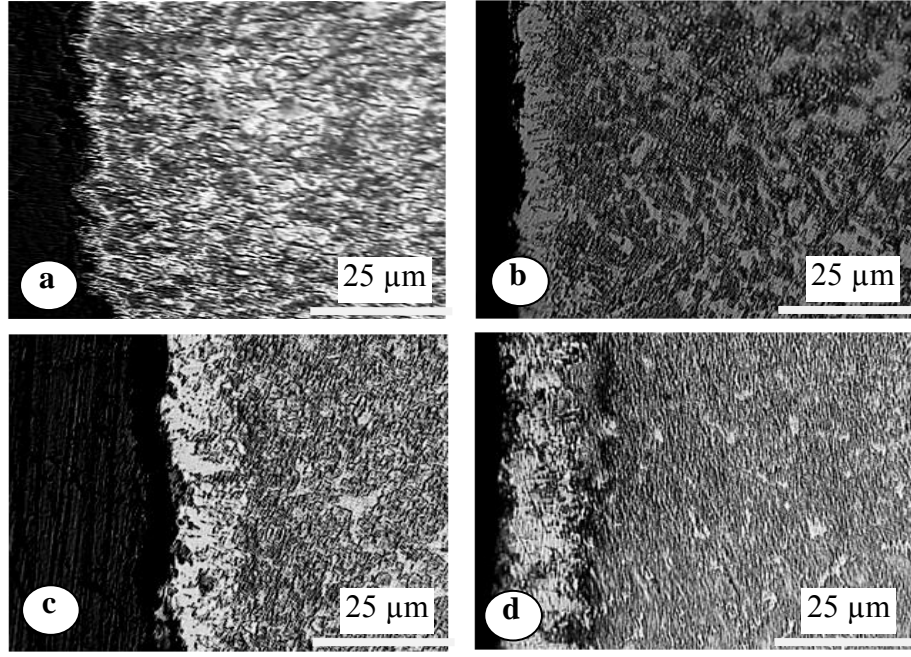


Şekil 7.5. 8640 çeliğinde 850 °C, 900 °C ve 950 °C’de borlama süresine bağlı olarak bor tabaka kalınlığının değişimi.

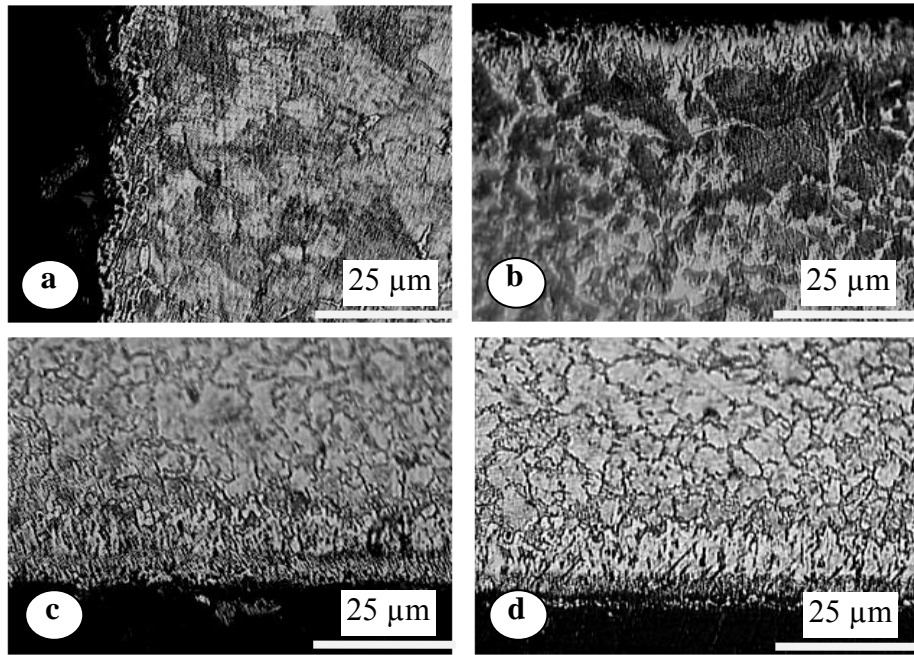
850, 900 ve 950 °C sıcaklıklarda 2, 4, 6 ve 8 saat borlanan GS 60 çelik numunelere ait mikroyapı görüntüleri Şekil 7.6. - Şekil 7.8.’de verilmiştir. Şekillerden borlanmış numunelerin yüzeylerindeki borürlerin 8640 çeliğinde olduğu gibi düzgün dallı kolonsal bir morfolojiye sahip oldukları görülmektedir.

Şekil 7.9’da aynı borlama süresinde farklı sıcaklıklarda, sıcaklığın artması ile bor katman kalınlığı 8640 çeliğinde olduğu gibi GS 60 çeliğinde de artmıştır. Aynı sıcaklıkta sürenin artması ile birlikte bor katman kalınlığının da yine arttığı görülmektedir.

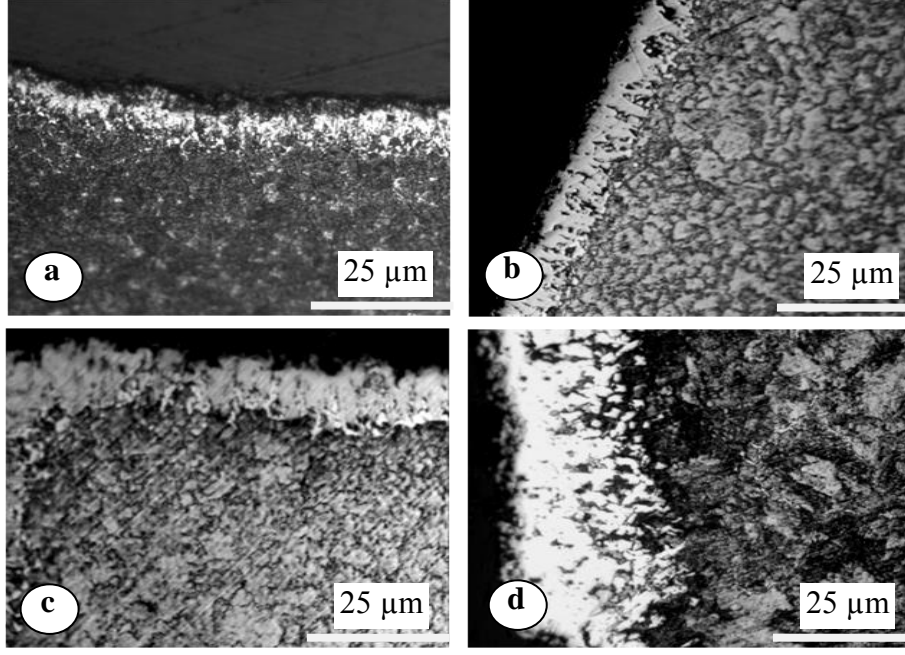
850 °C’de 2 saat borlanan AISI 8640 numunenin borür katman kalınlığı 40 µm iken, 950 °C’de 8 saat borlanan numunenin borür katman kalınlığı 172 µm olarak ölçülmüştür. Aynı şekilde 850 °C’de 2 saat borlanan GS 60 numunenin borür katman kalınlığı 34 µm iken, 950 °C’de 8 saat borlanan numunenin borür katman kalınlığı 125 µm olarak ölçülmüştür (Şekil 7.5 ve Şekil 7.9).



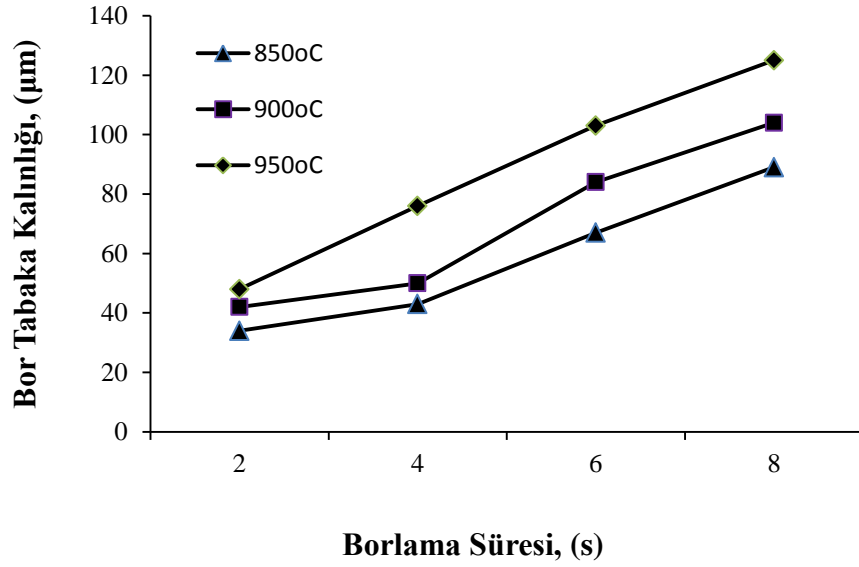
Şekil.7.6. 850 °C’de a) 2 b) 4 c) 6 ve d) 8 saat borlanan GS 60 çelik numunelere ait mikroyapılar.



Şekil 7.7. 900 °C’de a) 2 b) 4 c) 6 ve d) 8 saat borlanan GS 60 çelik numunelere ait mikroyapılar.



Şekil 7.8. 950 °C’de a) 2 b) 4 c) 6 ve d) 8 saat borlanan GS 60 çelik numunelere ait mikroyapılar.



Şekil 7.9. GS 60 çeliğinde 850 °C 900 °C ve 950 °C’de borlama süresine bağlı olarak bor tabaka kalınlığının değişimi.

Farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış numunelerin Şekil 7.2-7.4’de ve Şekil 7.6-7.8’de de görüldüğü gibi kolonsal bir yapıda olduğu ve malzemenin yüzeyinde homojen bir yapı sergilediği tespit edilmiştir. Bu durumun malzemenin bileşimindeki alaşım elementlerinden olduğu düşünülmektedir. Pek çok araştırmacı, termokimyasal

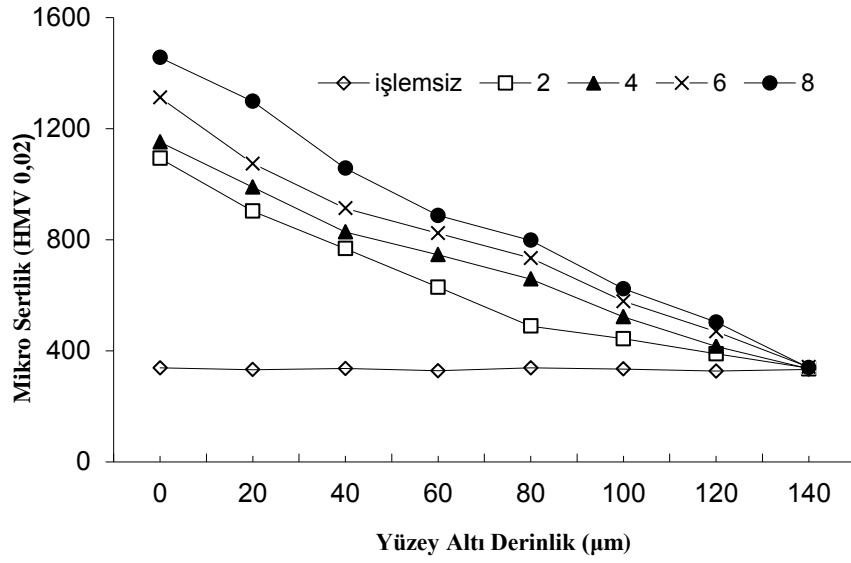
yöntemlerle borlanan düşük alaşımlı çeliklerin borür tabakasının kolonsal bir yapı sergilediğini belirtmektedir [26-28,63]. Kolonsal yapı borür katmanının karakteristik özelliğidir. Kaplama ve ana malzeme arasında diş biçimli geçişin oluşma miktarı işlem sıcaklığı ve süresine bağlı olduğu kadar malzemenin içerisindeki alaşım elementlerinin konsantrasyonuna da bağlıdır [15,63]. Çelik ve dökme demirlerde alaşım elementlerinin oranı arttıkça kolonsal yapı azalır. Borür katmanları kolonsal yapıdan dolayı ana malzemeye daha iyi yapışır [63].

7.2. MİKRO SERTLİK ÖLÇÜMLERİ

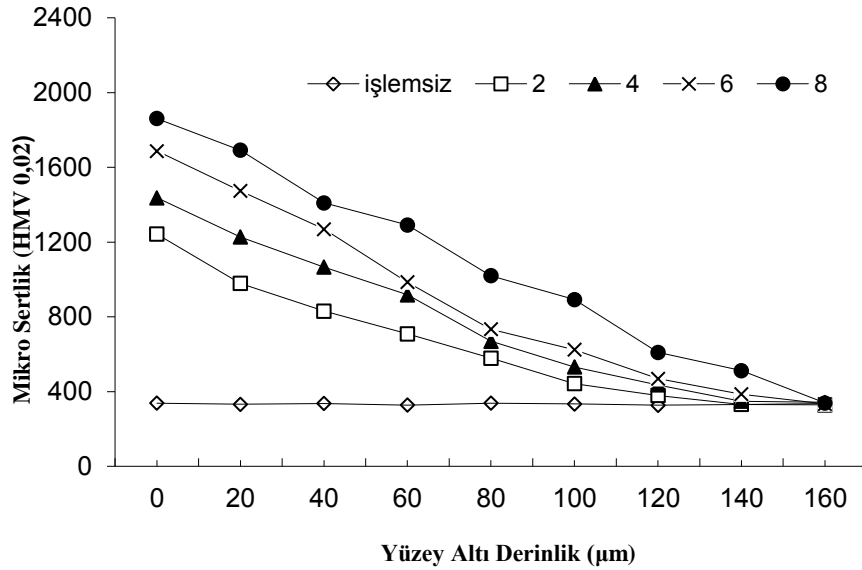
Mikro sertlik ölçüm sonuçlarına göre borlama sıcaklığı ve süresinin (850, 900 ve 950 °C sıcaklıklarda 2, 4, 6 ve 8 saat) artmasıyla sertlik değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Sertlikteki bu değişimler Şekil 7.10 - 7.15'de verilmektedir. Borlanmış yüzeyden iç kısma inildikçe sertliğin azaldığı ve belirli bir mesafeden sonra sertliğin sabit bir sertlik değerine ulaştığı tespit edilmiştir.

Borlanmamış AISI 8640 çeliğinde krom, karbon ve mangan oranı GS 60 çeliğine göre daha fazla bulunduğundan, bu çelik GS 60 çeliğinden daha serttir. Nitekim borlanmamış AISI 8640 çeliğinin sertliği 333 HV ve borlanmamış GS 60 çeliğinin sertlik değeri 293 HV olarak elde edilmiştir.

850 °C'de 2 saat borlanmış 8640 çeliğinin en dış kısmındaki sertlik 1093 HV, 4 saat borlanmış numunede 1152 HV, 6 saat borlanmış numunede 1312 HV, 8 saat borlanmış numunede 1456 HV matris sertlikleri de 337 HV olarak ölçülmüştür.

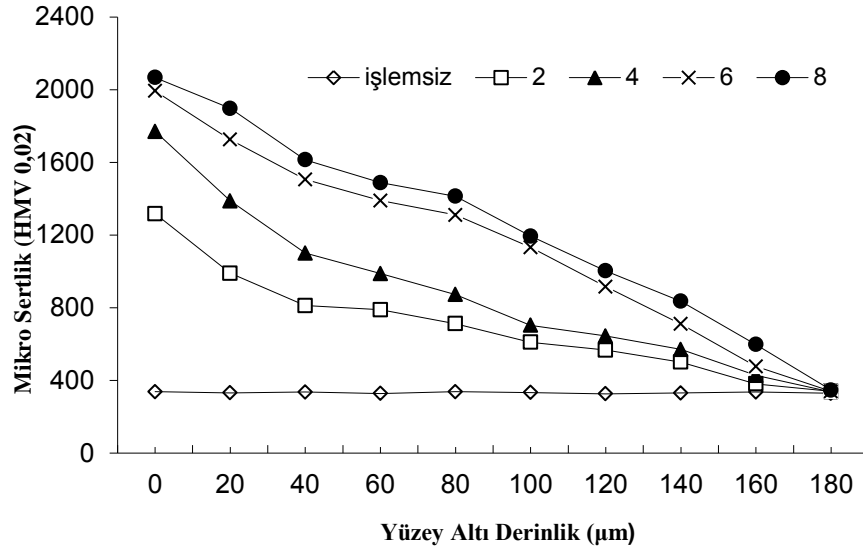


Şekil 7.10. 850 °C'de borlanan 8640 çelik numunelerin yüzey altından alınan mikro sertlik değerleri.



Şekil 7.11. 900 °C'de borlanan 8640 çelik numunelerin yüzey altından alınan mikro sertlik değerleri.

900 °C'de 2 saat borlanmış 8640 çeliğinin en dış kısmındaki sertlik 1243 HV, 4 saat borlanmış numunede 1437 HV, 6 saat borlanmış numunede 1687 HV, 8 saat borlanmış numunede 1861 HV matris sertlikleri de 336 HV olarak ölçülmüştür.



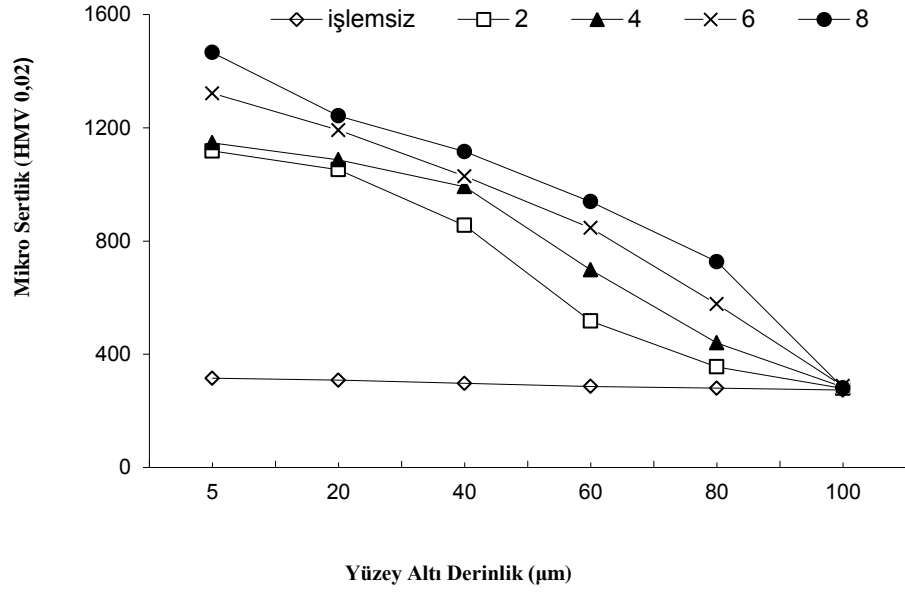
Şekil 7.12. 950 °C’de borlanan 8640 çelik numunelerin yüzey altından alınan mikro sertlik değerleri.

950 °C’de 2 saat borlanmış 8640 çeliğinin en dış kısmındaki sertlik 1317 HV,4 saat borlanmış numunede 1770 HV, 6 saat borlanmış numunede 1993 HV, 8 saat borlanmış numunede 2067 HV matris sertlikleri de 338,8 HV olarak ölçülmüştür.

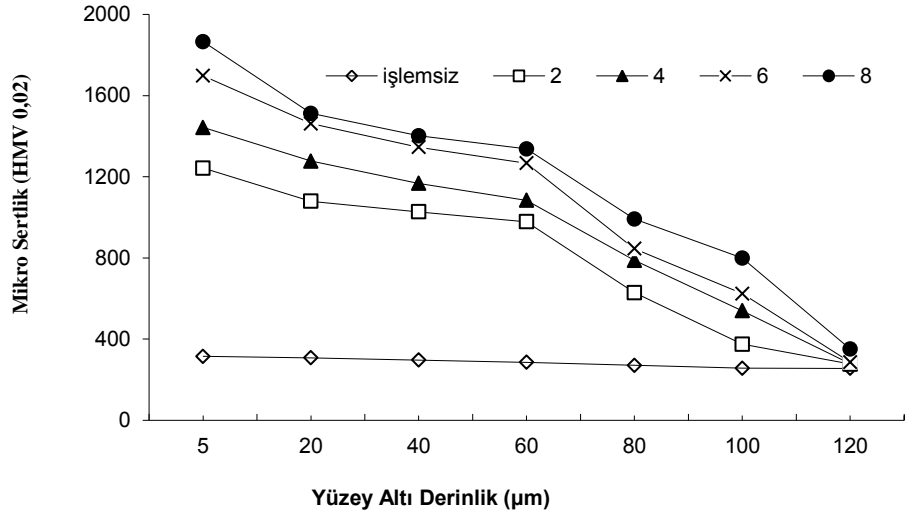
850 °C’de 2 saat borlanmış GS 60 çeliğinin en dış kısmındaki sertlik 1118 HV,4 saat borlanmış numunede 1147 HV, 6 saat borlanmış numunede 1412 HV, 8 saat borlanmış numunede 1466 HV matris sertlikleri de 293 HV olarak ölçülmüştür.

900 °C’de 2 saat borlanmış GS 60 çeliğinin en dış kısmındaki sertlik 1243 HV,4 saat borlanmış numunede 1443 HV, 6 saat borlanmış numunede 1698 HV, 8 saat borlanmış numunede 1866 HV matris sertlikleri de 290 HV olarak ölçülmüştür.

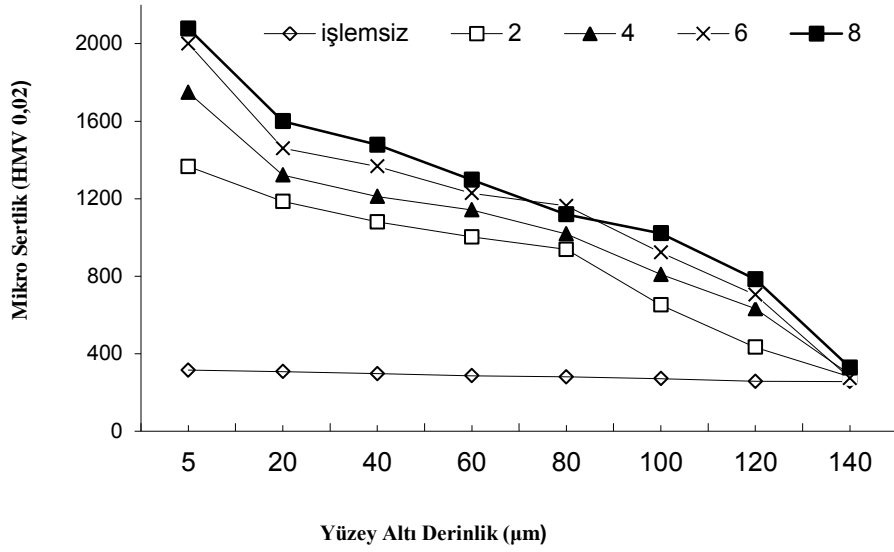
950 °C’de 2 saat borlanmış GS 60 çeliğinin en dış kısmındaki sertlik 1366 HV,4 saat borlanmış numunede 1748 HV, 6 saat borlanmış numunede 2000 HV, 8 saat borlanmış numunede 2078 HV matris sertlikleri de 289 HV olarak ölçülmüştür.



Şekil 7.13. 850 °C'de borlanan GS 60 çelik numunelerin yüzey altından alınan mikro sertlik değerleri.



Şekil 7.14. 900 °C'de borlanan GS 60 çelik numunelerin yüzey altından alınan mikro sertlik değerleri.



Şekil 7.15. 950 °C’de borlanan GS 60 çelik numunelerin yüzey altından alınan mikro sertlik değerleri.

Şekil 7.10 - 7.15 incelendiğinde en fazla borür katman sertliğinin 950 °C’de 8 saat borlanmış numunelerde olduğu görülmektedir. Şen ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada, borlama sıcaklığının ve süresinin artması ile bor katmanı sertliğinin arttığını belirtmişlerdir [63,64]. Ancak yüksek sıcaklıklarda yüzeydeki borür tabakası bozulmakta ve sertlikte de düşüşler olmaktadır. Şen, AISI 5140, 4140 ve 4340 çelikleri 1050 °C’de 6 ve 8 saat borlanmış, sonunda yüzeydeki borür tabakasının bozularak gözenekli bir yapıya dönüştüğünü, sertliğin azaldığını ve tabakada mikro çatlakların meydana geldiğini belirtmiştir [26].

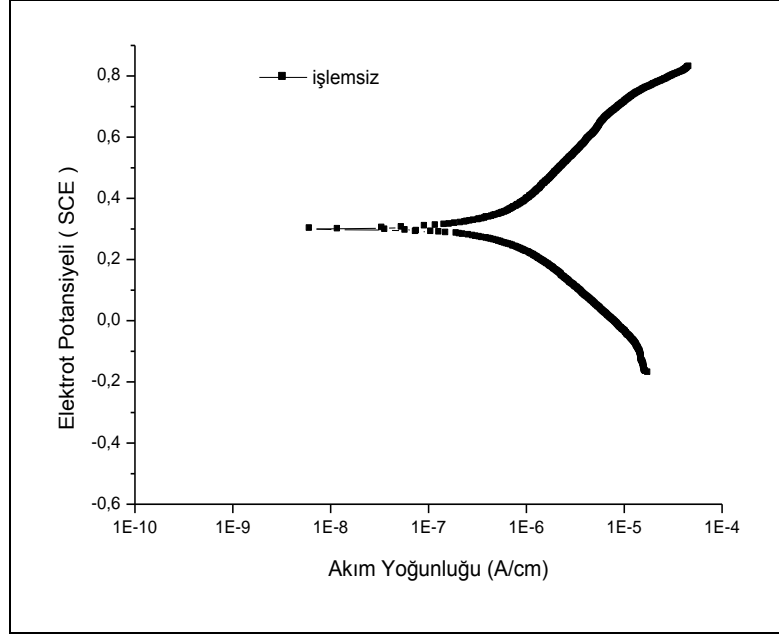
Her iki çelik mikro sertlik açısından karşılaştırıldığında borlanan GS 60 çeliğinin borür bölgesinin AISI 8640 çeliğinin borür bölgesinden daha yüksek sertliğe sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu da AISI 8640 çeliğinin yapısında bulunan krom elementinin borun bir kısmını kendisine bağlayarak daha fazla FeB oluşmasını önlemesinden ileri gelmektedir. En fazla sertlik 950 °C’de 8 saat borlanmış GS 60 çeliğinde meydana gelirken en az sertlik ise 850 °C’de 2 saat borlanmış AISI 8640’da meydana gelmiştir.

Sertlik dağılım diyagramında üç bölge vardır ve bunlar (i) borürlerden müteşekkil bölge, (ii) bor bakımından zengin geçiş bölgesi, (iii) matris şeklindedir [63].

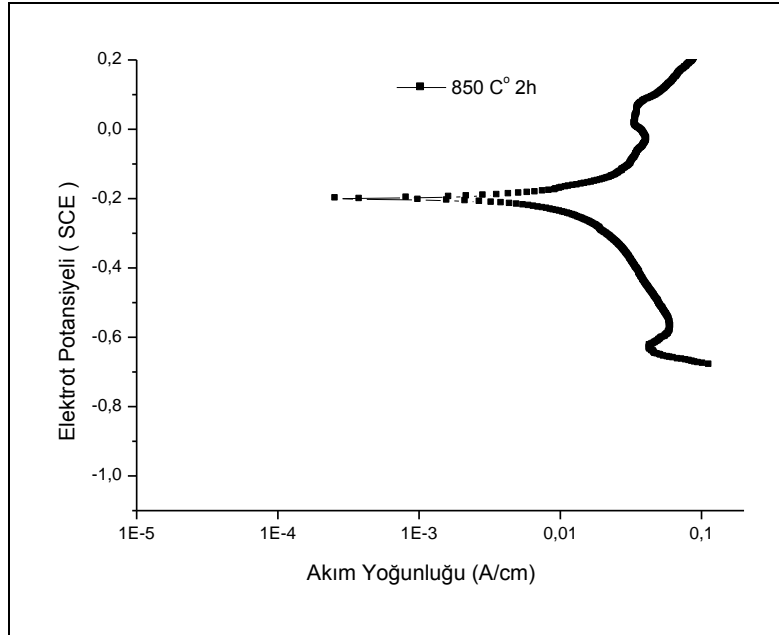
Borürlerin olduğu yer (i) bölgede, en yüksek sertlik gözlenmektedir. En dışta FeB fazı bulunduğundan en sert tabaka burasıdır. Daha sonra Fe₂B fazı bulunduğundan Fe₂B fazının sertliği FeB fazından biraz düşüktür. Bor bakımından zengin (ii) bölge ise geçiş bölgesidir ve sertlik burada fazla düşüş göstermektedir. Matriste (iii) bölgesinde ise, sertlik ana malzemenin sertliğine yakın bir değer almaktadır. Elde edilen sertlik değerleri kolonların hemen bitiminden matrise doğru gidildikçe önemli ölçüde azalma göstermektedir. Pek çok araştırmacının yapmış olduğu deneyler bunu doğrulamaktadır [16,20,63-67]. Bunun nedeni, kolonların dışında bor atomlarının matrise doğru difüze olmaları ve katı eriyik sertleşmesi oluşmasıdır [26].

7.3. KOROZYON DENEYİ SONUÇLARI

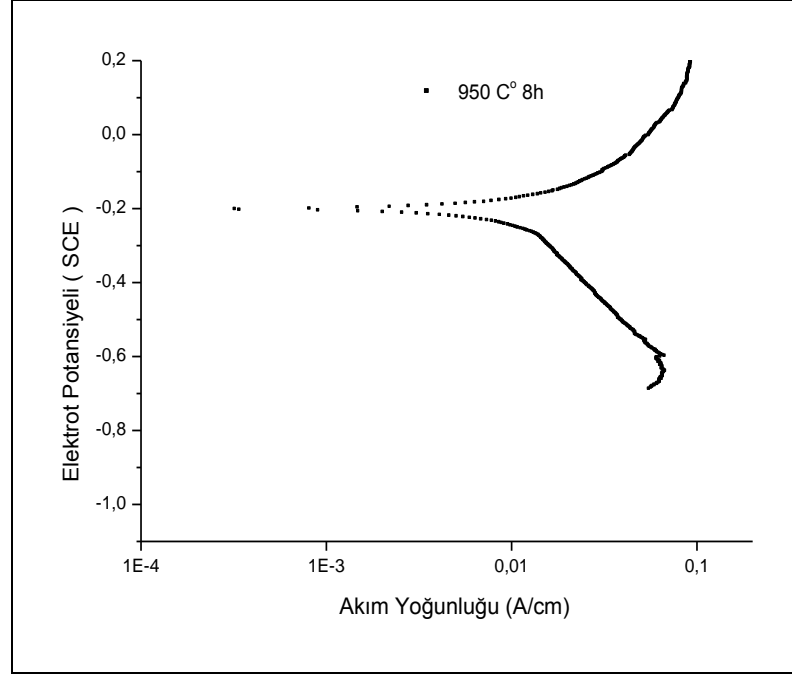
İşlemsiz ve borlanmış AISI 8640 çeliklerin saf su ve %10 HNO₃ çözeltileri içerisinde potansiyostat kullanılarak yapılan korozyon deneylerinden elde edilen potansiyodinamik polarizasyon eğrileri Şekil 7.16 – 7.18.’de verilmiştir. Bu eğrilerden elde edilen korozyon akım yoğunluğu (I kor) ve korozyon potansiyeli değerleri Çizelge 7.1’de verilmiştir. Korozyon potansiyeli/korozyon akımı eğrileri, incelenen AISI 8640 numunelerin korozyon potansiyellerinin yaklaşık olarak değiştiği, korozyon akımlarının ise borlama süresi ve sıcaklığın artmasıyla düştüğünü göstermektedir. En yüksek korozyon akımı işlemsiz numunelerde iken 950 °C’de 8 saat borlanan numunelerde ise korozyon akımı en düşük seviyededir.



Şekil 7.16. İşlemsiz AISI 8640 çeliğinin polarizasyon eğrisi.



Şekil 7.17. 850 °C'de 2 saat borlanan AISI 8640 çeliğinin polarizasyon eğrisi.

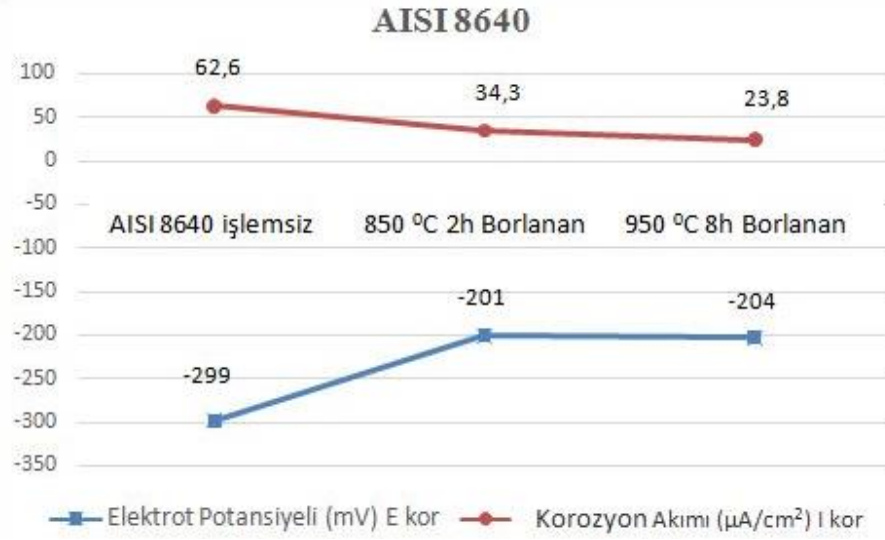


Şekil 7.18. 950 °C’de 8 saat borlanan AISI 8640 çeliğinin polarizasyon eğrisi.

AISI 8640 çeliğinde korozyon potansiyeli -201 mV ile -299 mV arasında değişirken korozyon akımı ise 62,60 μ A seviyelerinden 23,80 μ A seviyelerine kadar düşmüştür (Çizelge 7.1 ve Şekil 7.19).

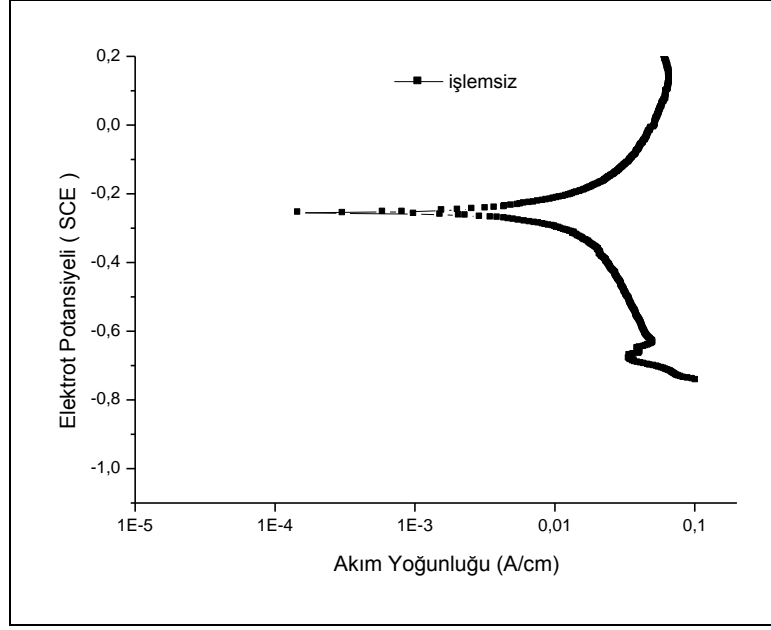
Çizelge 7.1. Korozyon akımı ve korozyon potansiyeli değerleri.

	AISI 8640 işlemsiz	850 °C- 2h Borlanan	950 °C- 8h Borlanan
Elektrot Potansiyeli (mV) E kor	-299,0 mV	-201,0 mV	-204,0 mV
Korozyon Akımı (μ A / cm ²) I kor	62,60 mA	34,30 mA	23,80 mA

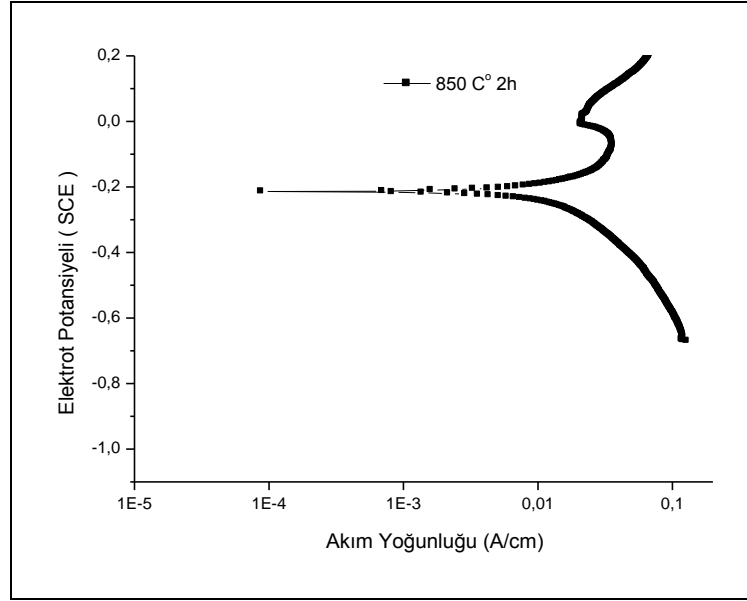


Şekil 7.19. Korozyon akımı ve korozyon potansiyeli değerleri.

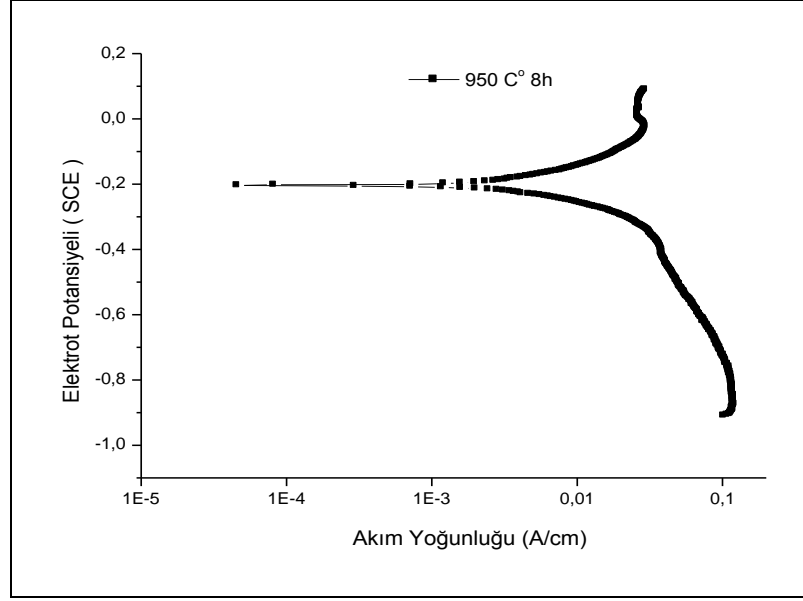
İşlemsiz ve borlanmış GS 60 çeliklerin saf su derişikliğinde %10 HNO₃çözeltileri içerisinde potansiyostat kullanılarak yapılan korozyon deneylerinden elde edilen potansiyodinamik polarizasyon eğrileri ise Şekil 7.20. - 7.22.'de verilmiştir. Bu eğrilerden elde edilen korozyon akım yoğunluğu (I kor) ve korozyon potansiyeli değerleri Çizelge 7.2'de verilmiştir. Korozyon potansiyeli/korozyon akımı eğrileri, incelenen GS 60 çeliğinde de korozyon potansiyellerinin yaklaşık olarak değıştığı, korozyon akımlarının ise borlama süresi ve sıcaklığın artmasıyla düştüğünü göstermektedir. AISI 8640 çeliğinde olduğu gibi en yüksek korozyon akımı işlemsiz GS 60 numunelerde iken 950 °C'de 8 saat borlanan GS 60 numunelerde ise korozyon akımı en düşük seviyededir.



Şekil 7.20. İşlemsiz GS 60 çeliğinin polarizasyon eğrisi.



Şekil 7.21. 850 °C'de 2 saat borlanan GS 60 çeliğinin polarizasyon eğrisi.

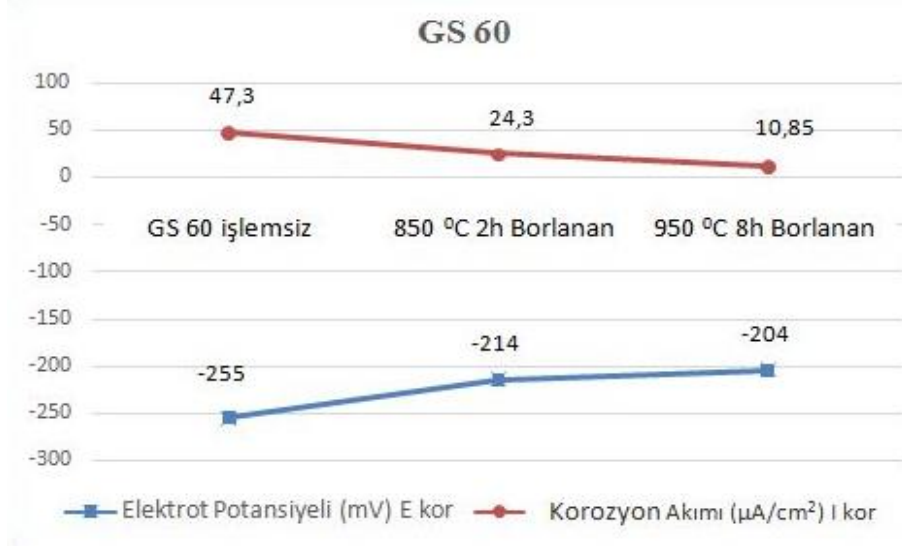


Şekil 7.22. 950 °C'de 8 saat borlanan GS 60 çeliğinin polarizasyon eğrisi.

GS 60 çeliğinde korozyon potansiyeli ise -204 mV ile -255 mV arasında değişirken korozyon akımı ise 47,30 μ A seviyelerinden 10,85 μ A seviyelerine kadar düşmüştür (Çizelge 7.2 ve Şekil 7.23).

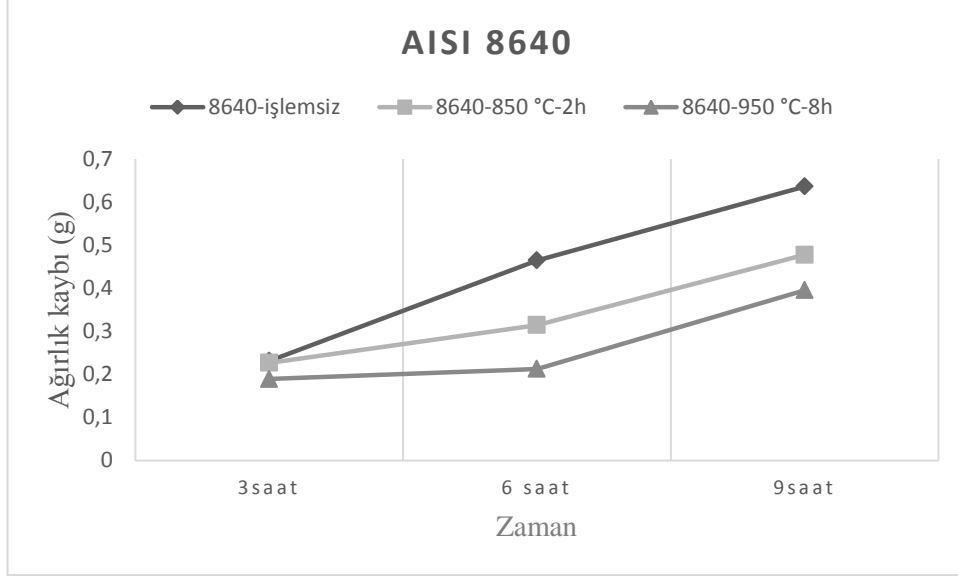
Çizelge 7.2. Korozyon akımı ve korozyon potansiyeli değerleri.

	GS 60 işlemsiz	850 °C- 2h Borlanan	950 °C- 8h Borlanan
Elektrot Potansiyeli (mV) E kor	255,0 mV	214,0 mV	204,0 mV
Korozyon Akımı (μ A / cm ²) I kor	47,30 mA	42,30 mA	10,85 mA



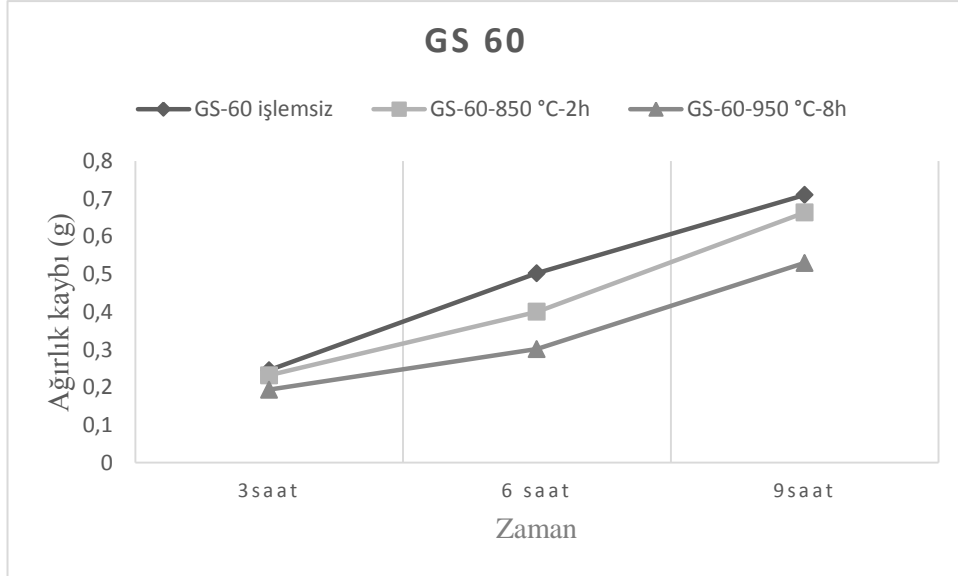
Şekil 7.23. Korzyon akımı ve korzyon potansiyeli değerleri.

Şekil 7.24 ve 7.25’de %10 olan HNO_3 çözeltilisine daldırılarak yapılmış korzyon deney sonuçları, ağırlık kaybı değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi verilmiştir. Korzyon deney sonuçları genel olarak literatürde olduğu gibi ortalama ağırlık kaybı olarak bulunmuştur. 950 °C’ de 8 saat borlanan AISI 8640 çeliğinde ağırlık kaybı borlanmamış AISI 8640 ve 850 °C’ de 2 saat borlanan AISI 8640 çeliğinden daha azdır. Bunun nedeni yüzeydeki borun, korzyonu belli oranda engellemesi olarak düşünölmektedir (Şekil 7.24).



Şekil 7.24. AISI 8640 çeliğinin daldırılarak yapılmış korozyon sonrası zamana bağlı olarak ağırlık kayıplarının değişimi.

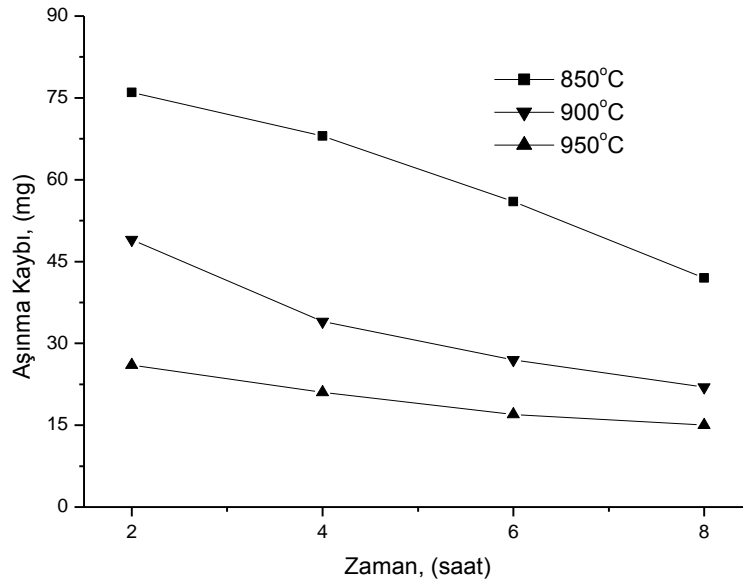
AISI 8640 çeliğinde olduğu gibi, 950 °C’ de 8 saat borlanan GS 60 çeliğinde ağırlık kaybı borlanmamış GS 60 ve 850 °C’ de 2 saat borlanan GS 60 çeliğinden daha azdır (Şekil 7.25).



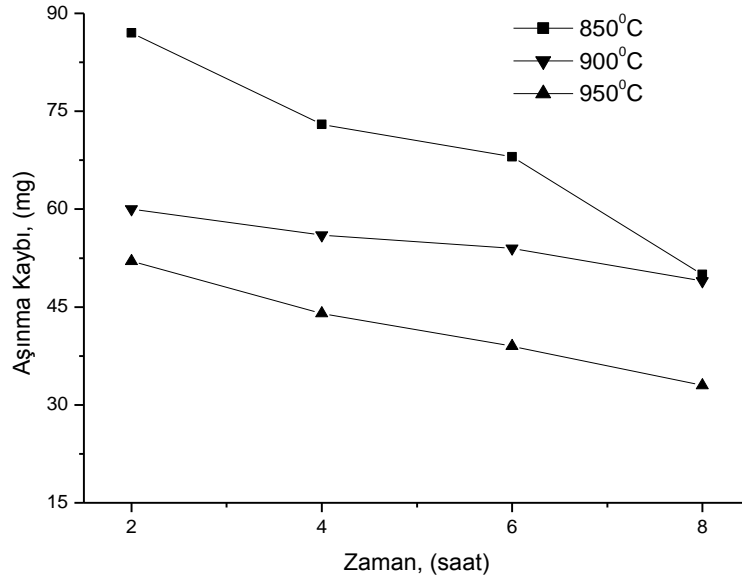
Şekil 7.25. GS 60 çeliğinin daldırılarak yapılmış korozyon sonrası zamana bağlı olarak ağırlık kayıplarının değişimi.

7.4. AŞINMA DENEYİ SONUÇLARI

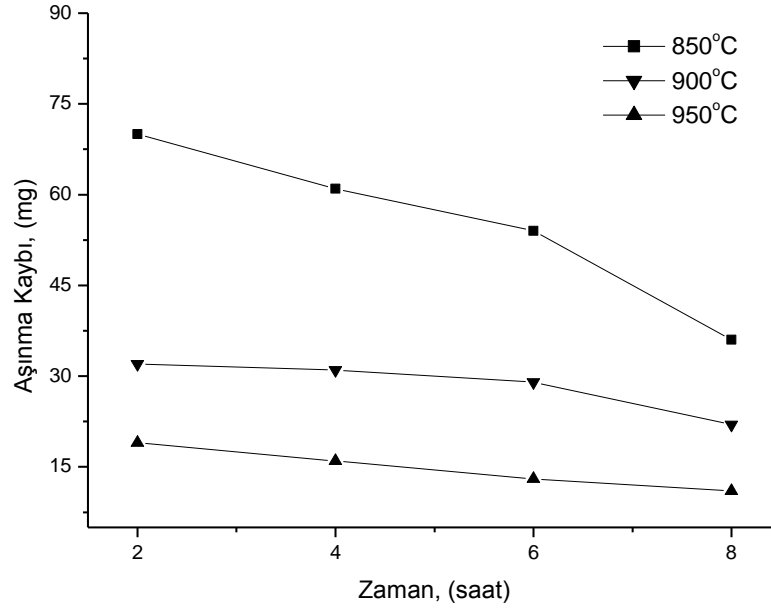
Döküm durumu AISI 8640 çelik ve GS 60 çelik malzemelerin aşınma davranışı incelendiğinde abrasif zımpara boyutunun artmasıyla (1000 mesh'den 1200 mesh'e) aşınma kaybının, daha az olduğu görülmüştür. Yapılan araştırmalar sonucunda aşındırıcı tane büyüklüğü arttıkça, malzemenin aşınma kaybının arttığı tespit edilmiştir. Aşınma kaybını uygulanan yüklere göre değerlendirdiğimizde, yükün artması ile birlikte aşınma kaybı artmaktadır. Artan borlama süresine bağlı olarak aşınma kaybının da azaldığı görülmektedir. En az aşınma kaybı 950 °C'de 8 saat borlanmış malzemelerde tespit edilmiştir. Bunun nedeni borlama süresine bağlı olarak malzemenin yüzeyinde FeB oluşmasıdır. FeB fazı malzemenin sertliğini ve aşınma direncini artırmaktadır [21,63-67]. Tüm deney şartları için 850 °C'de 2 saat borlanan numunelerin en fazla aşınma kaybına uğradığı tespit edilmiştir (Şekil 7.26, - 7.33).



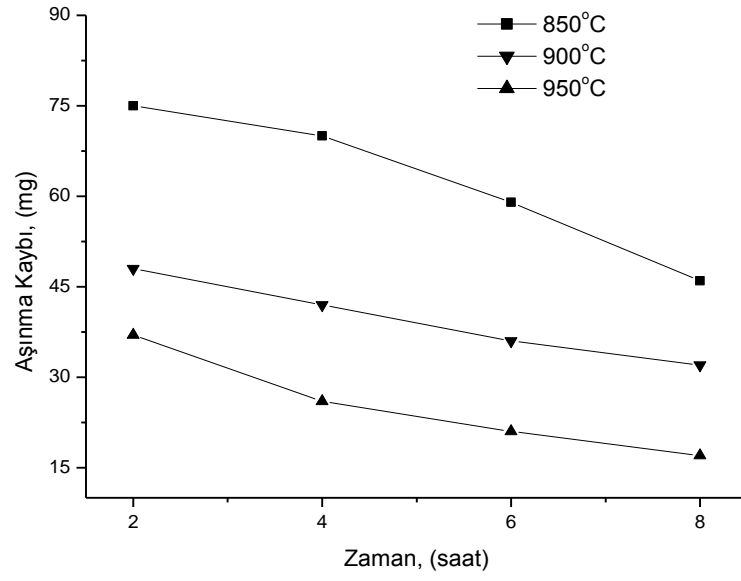
Şekil 7.26. Farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış AISI 8640 çeliğinin 1000 mesh Al_2O_3 zımparada ve 10 N yük altındaki aşınma durumu.



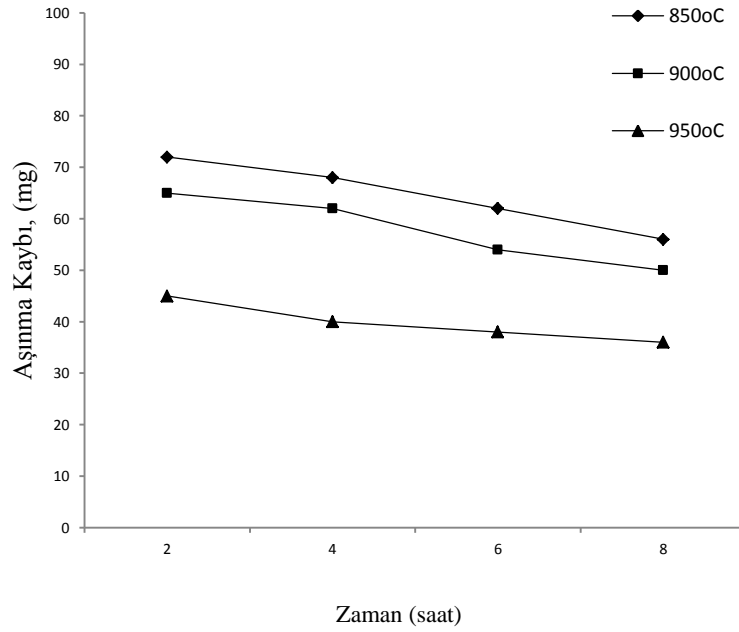
Şekil 7.27. Farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış AISI 8640 çeliğinin 1000 mesh Al_2O_3 zımparada ve 20 N yük altındaki aşınma durumu.



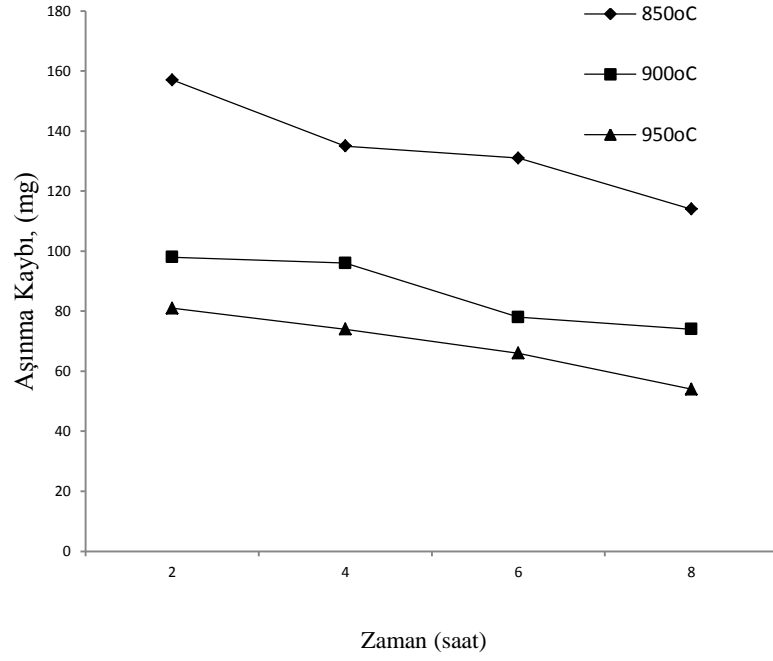
Şekil 7.28. Farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış AISI 8640 çeliğinin 1200 mesh Al_2O_3 zımparada ve 10 N yük altındaki aşınma durumu.



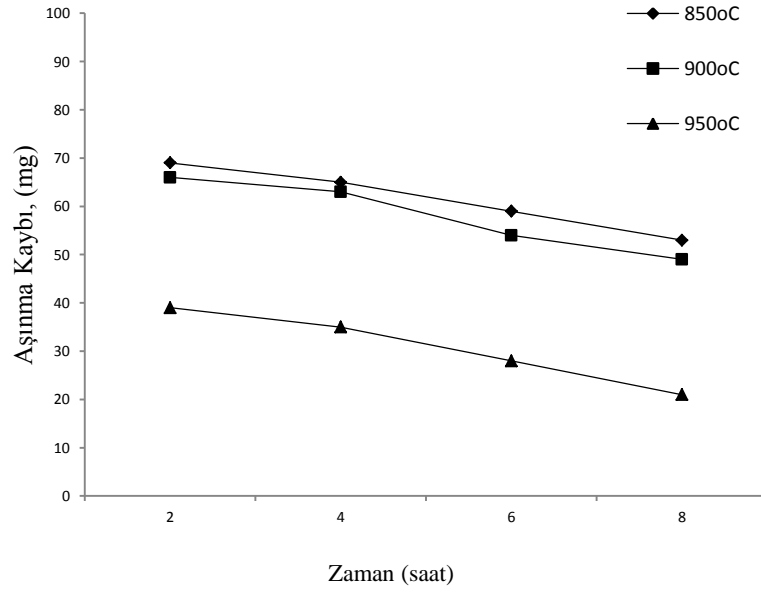
Şekil 7.29. Farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış AISI 8640 çeliğinin 1200 mesh Al_2O_3 zımparada ve 20 N yük altındaki aşınma durumu.



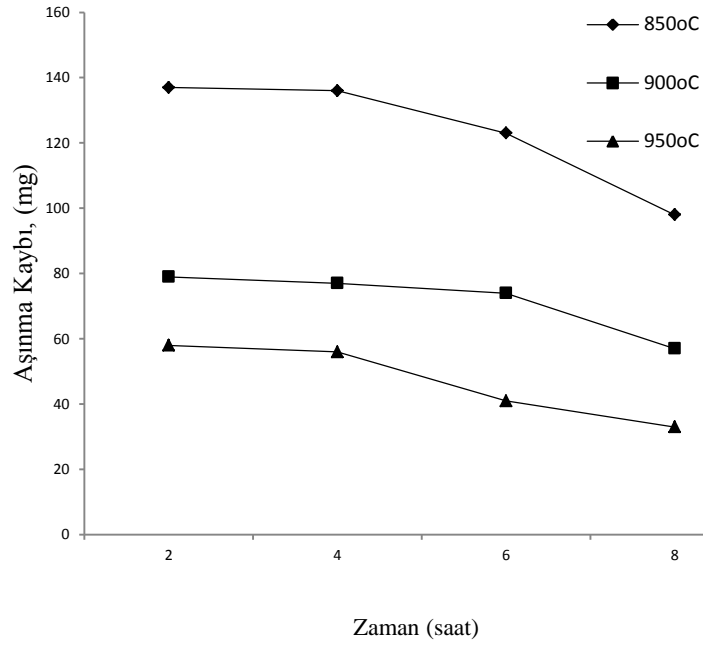
Şekil 7.30. Farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış GS 60 çeliğinin 1000 mesh Al_2O_3 zımparada ve 10 N yük altındaki aşınma durumu.



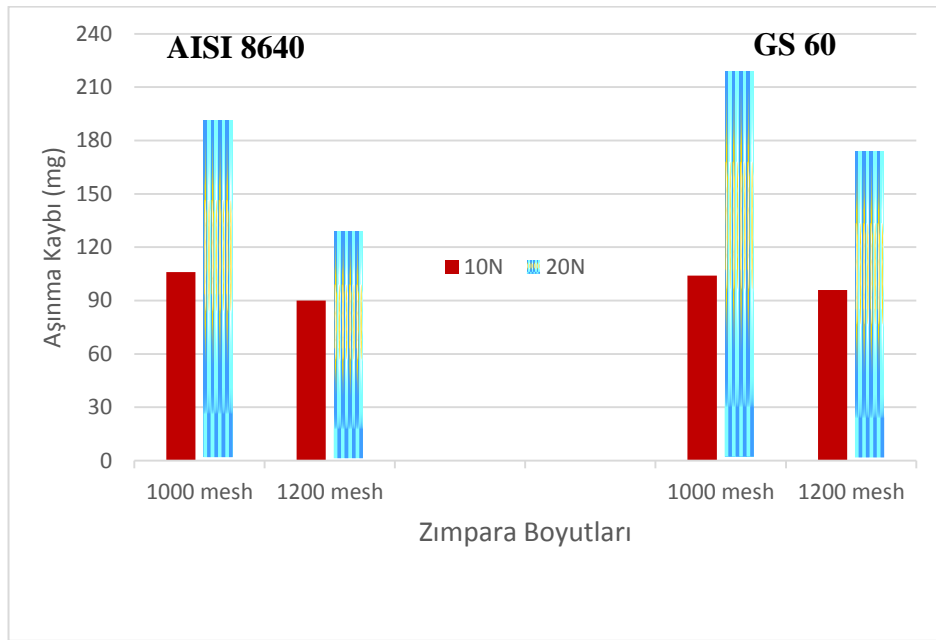
Şekil 7.31. Farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış GS 60 çeliğinin 1000 mesh Al_2O_3 zımparada ve 20 N yük altındaki aşınma durumu.



Şekil 7.32 Farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış GS 60 çeliğinin 1200 mesh Al_2O_3 zımparada ve 10 N yük altındaki aşınma durumu.



Şekil 7.33. Farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış GS 60 çeliğinin 1200 mesh Al_2O_3 zımparada ve 20 N yük altındaki aşınma durumu.

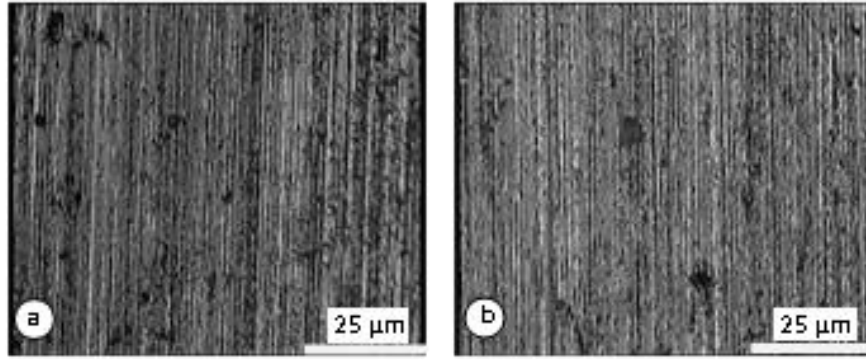


Şekil 7.34. Borlanmamış AISI 8640 ve GS 60 çeliklerinin 1000 ve 1200 mesh Al_2O_3 zımparada aşınma kayıplarının karşılaştırılması.

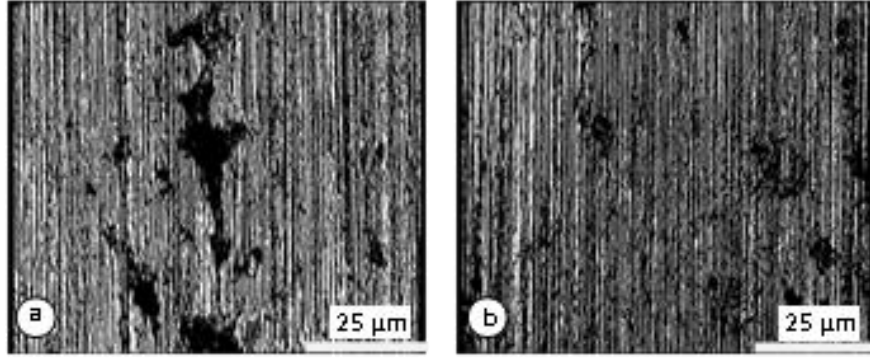
Şekil 7.34 incelendiğinde borlanmamış GS 60 çeliğinin aşınma kaybının, AISI 8640 çeliğinin aşınma kaybına göre daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun nedeni borlanmamış AISI 8640 çeliğinin, borlanmamış GS 60 çeliğinden daha sert

olmasıdır. Şekil incelendiğinde, artan aşındırıcı zımpara boyutu ve yükün artması ile aşınma kaybının da arttığı görülmektedir.

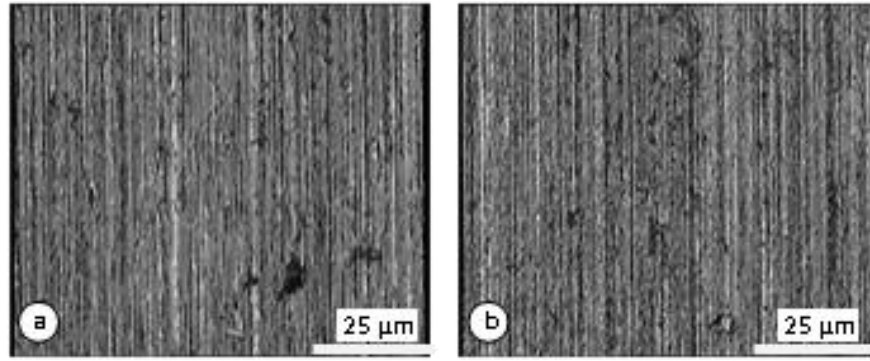
Aşınma testi yapılan döküm durumu ve diğer tüm numunelerin aşınma yüzeyi görüntüleri Şekil 7.35 - 7.46'da verilmiştir. 950 °C'de borlanan AISI 8640 çelik numunelerin aşınma yüzeyleri (Şekil 7.39 - 7.40), işlemsiz AISI 8640 çelik numunelerin (Şekil 7.35 - 7.36) ve 850 °C'de borlanan AISI 8640 çelik numunelerin aşınma yüzeyleri karşılaştırıldığında (Şekil 7.35 - 7.36) 950 °C'de borlanan AISI 8640 çelik numunelerin aşınma yüzeylerinde daha düzgün ve pürüzsüz ve derin olmayan yivlerden meydana geldiği görülmektedir. Bu duruma sebep olarak da bor tabaka kalınlığının artışına bağlıdır (Şekil 7.5).Mevcut deney sonuçları literatürle uyumludur [2,3,16,55]. 1000 mesh zımparada ve 20 N yük altında aşındırılmış döküm durumu numunenin en geniş ve derin aşınma yivlere sahip olduğu görülmektedir (Şekil 7.35). Her iki zımpara üzerinde, 950 °C'de borlanan numunelerin aşınma yüzeylerinin ince küçük ve daha düzgün/pürüzsüz bir aşınma yüzeyine sahip olduğu görülmektedir (Şekil 7.39 - 7.40).



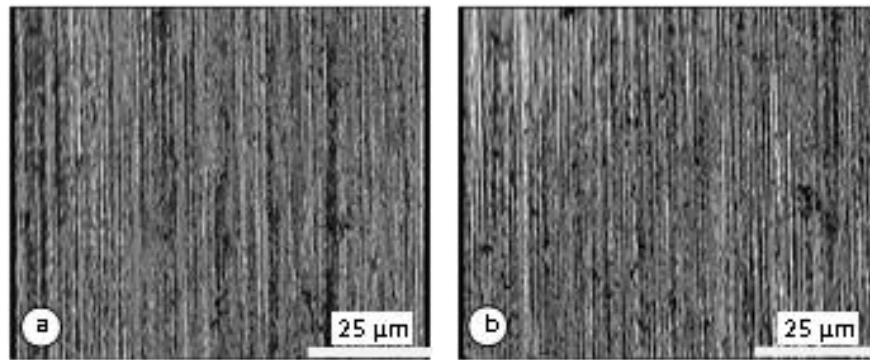
Şekil 7.35. İşlemsiz AISI 8640 çeliğinin a) 1000 mesh ve b) 1200 mesh Al_2O_3 zımparada 10 N yük altında aşınmış yüzeyinin görüntüsü.



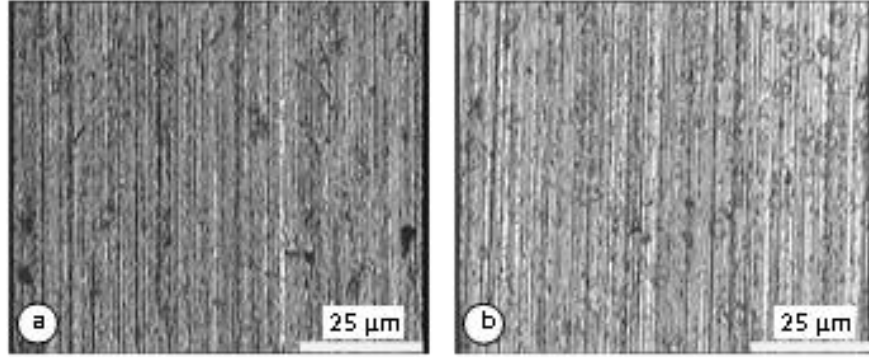
Şekil 7.36. İşlemsiz AISI 8640 çeliğinin a) 1000 mesh ve b) 1200 mesh Al_2O_3 zımparada 20 N yük altında aşınmış yüzeyinin görüntüsü.



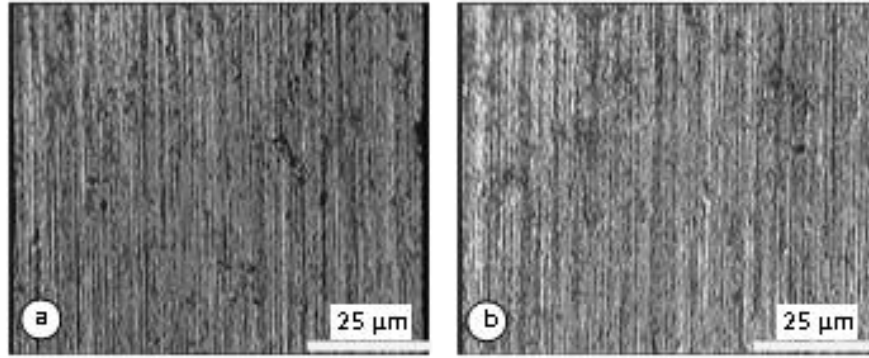
Şekil 7.37. 850 °C'de borlanan AISI 8640 çelik numunelerin a) 1000 mesh ve b) 1200 mesh Al_2O_3 zımparada 10 N yük altında aşınmış yüzeyinin görüntüsü.



Şekil 7.38. 850 °C'de borlanan AISI 8640 çelik numunelerin a) 1000 mesh ve b) 1200 mesh Al_2O_3 zımparada 20 N yük altında aşınmış yüzeyinin görüntüsü.

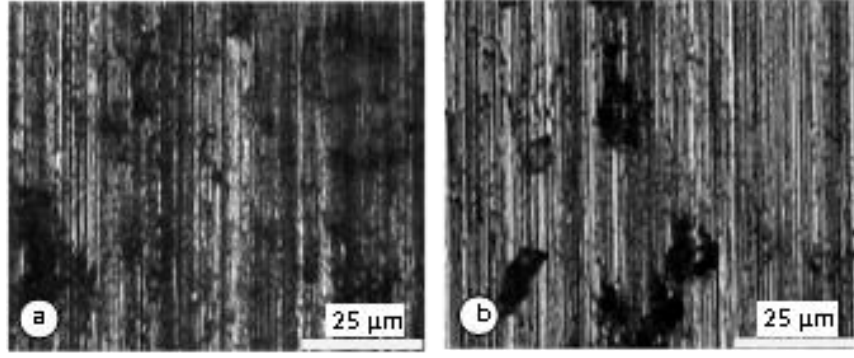


Şekil 7.39. 950 °C’de borlanan AISI 8640 çelik numunelerin a) 1000 mesh ve b) 1200 mesh Al₂O₃ zımparada 10 N yük altında aşınmış yüzeyinin görüntüsü.

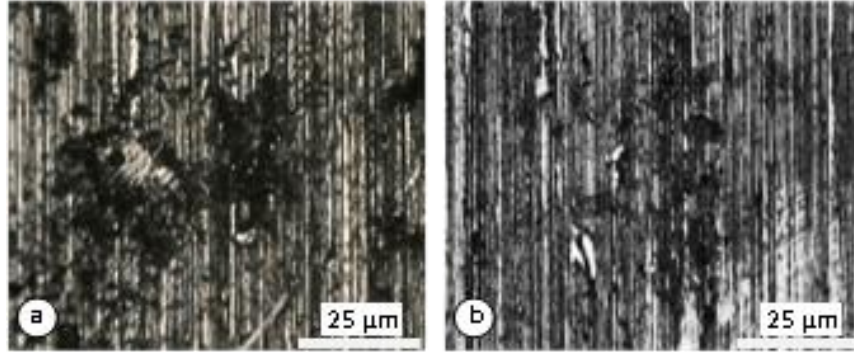


Şekil 7.40. 950 °C’de borlanan AISI 8640 çelik numunelerin a) 1000 mesh ve b) 1200 mesh Al₂O₃ zımparada 20 N yük altında aşınmış yüzeyinin görüntüsü.

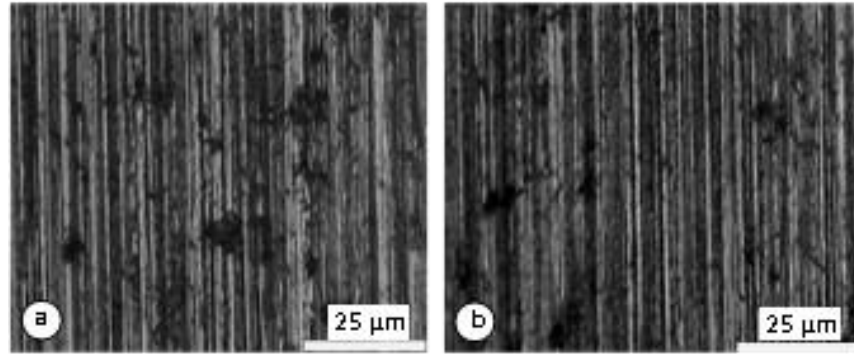
AISI 8640 çeliğinde olduğu gibi 950 °C’de borlanan GS 60 çelik numunelerin aşınma yüzeyleri (Şekil 7.45 - 7.46), işlemsiz GS 60 çelik numunelerin (Şekil 7.41 - 7.42) ve 850 °C’de borlanan AISI 8640 çelik numunelerin aşınma yüzeyleri karşılaştırıldığında (Şekil 7.43 - 7.44) 950 °C’de borlanan GS 60 çelik numunelerin aşınma yüzeylerinde daha düzgün ve pürüzsüz ve derin olmayan yivlerden meydana geldiği görülmektedir. Bu duruma sebep olarak da bor tabaka kalınlığının artışına bağlıdır (Şekil 7.9), mevcut deney sonuçları literatürle uyumludur [2,3,16,55]. 1000 mesh zımparada ve 20 N yük altında aşındırılmış döküm durumu (işlemsiz) numunenin en geniş ve derin aşınma yivlerinin olduğu görülmektedir (Şekil 7.35). Her iki zımpara üzerinde, 950 °C’de borlanan numunelerin aşınma yüzeylerinin ince küçük ve daha düzgün/pürüzsüz bir aşınma yüzeyine sahip olduğu görülmektedir (Şekil 7.39 - 7.40).



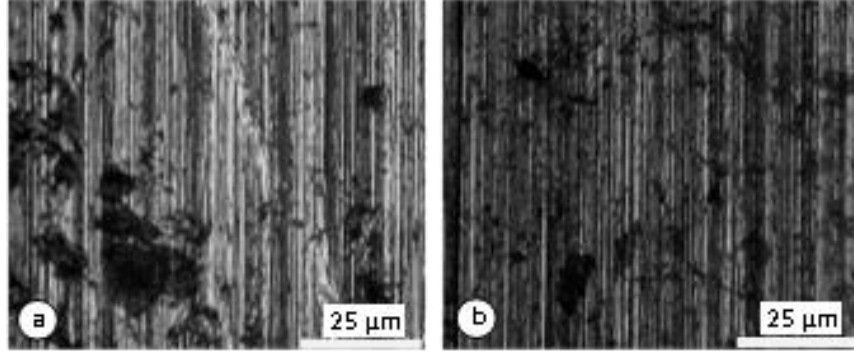
Şekil 7.41. Döküm durumu GS 60 çeliğinin a) 1000 mesh ve b) 1200 mesh Al₂O₃ zımparada 10 N yük altında aşınmış yüzeyinin görüntüsü.



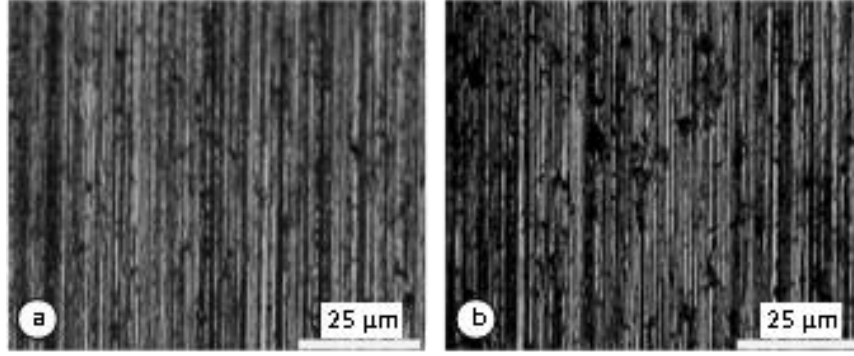
Şekil 7.42. Döküm durumu GS 60 çeliğinin a) 1000 mesh ve b) 1200 mesh Al₂O₃ zımparada 20 N yük altında aşınmış yüzeyinin görüntüsü.



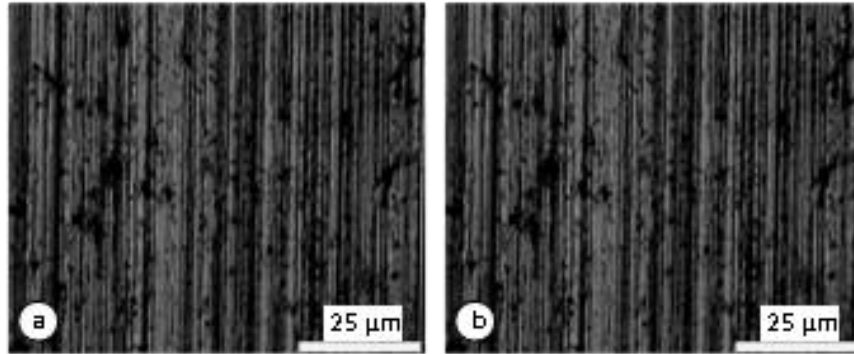
Şekil 7.43. 850 °C'de borlanan GS 60 çelik numunelerin a) 1000 mesh ve b) 1200 mesh Al₂O₃ zımparada 10 N yük altında aşınmış yüzeyinin görüntüsü.



Şekil 7.44. 850 °C’de borlanan GS 60 çelik numunelerin a) 1000 mesh ve b) 1200 mesh Al₂O₃ zımparada 20 N yük altında aşınmış yüzeyinin görüntüsü.



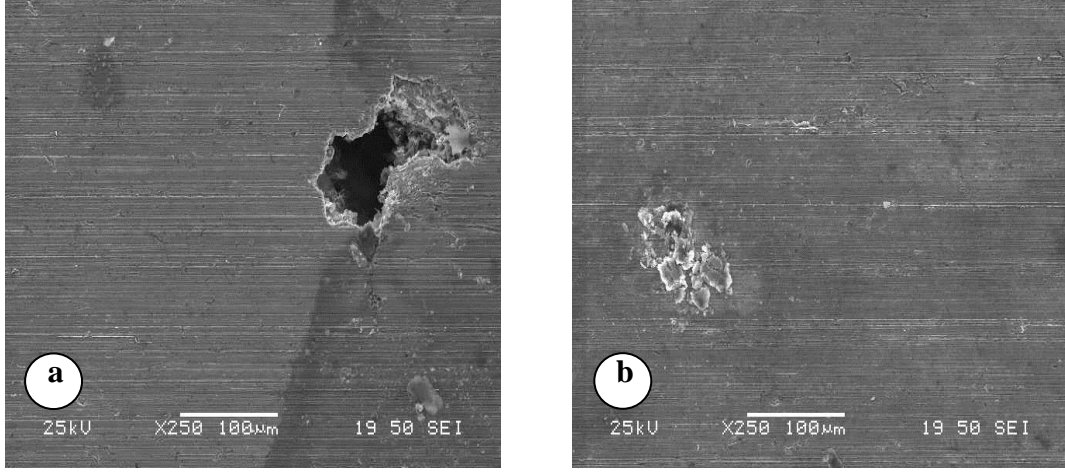
Şekil 7.45. 950°C’de borlanan GS 60 çelik numunelerin a) 1000 mesh ve b) 1200 mesh Al₂O₃ zımparada 10 N yük altında aşınmış yüzeyinin görüntüsü.



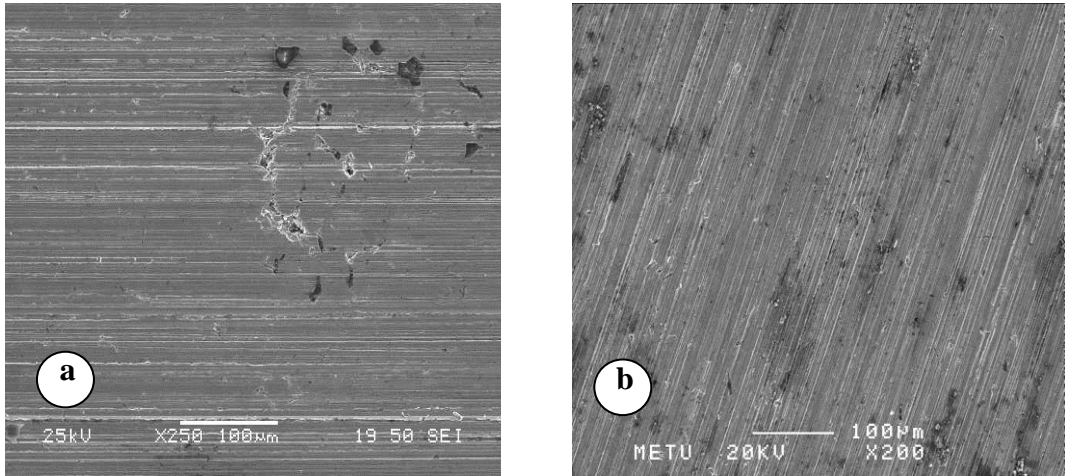
Şekil 7.46. 950°C’de borlanan GS 60 çelik numunelerin a) 1000 mesh ve b) 1200 mesh Al₂O₃ zımparada 20 N yük altında aşınmış yüzeyinin görüntüsü.

Pin-on disk aşınma deney cihazında 20 N yük altında, oda sıcaklığında, normal ve aynı şartlar altında “1000” mesh ile “1200” mesh Al₂O₃ aşındırıcı zımpara kullanılarak yapılan aşınma deneylerindeki numunelerin aşınmış yüzeyleri taramalı

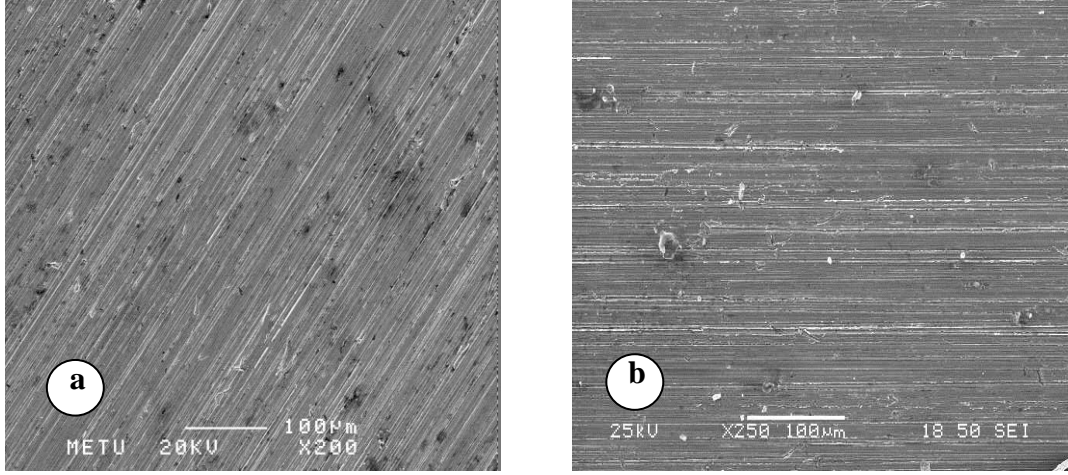
elektron mikroskopunda (SEM) incelenerek yüzey durumları Şekil 7.47–7.56’de verilmiştir.



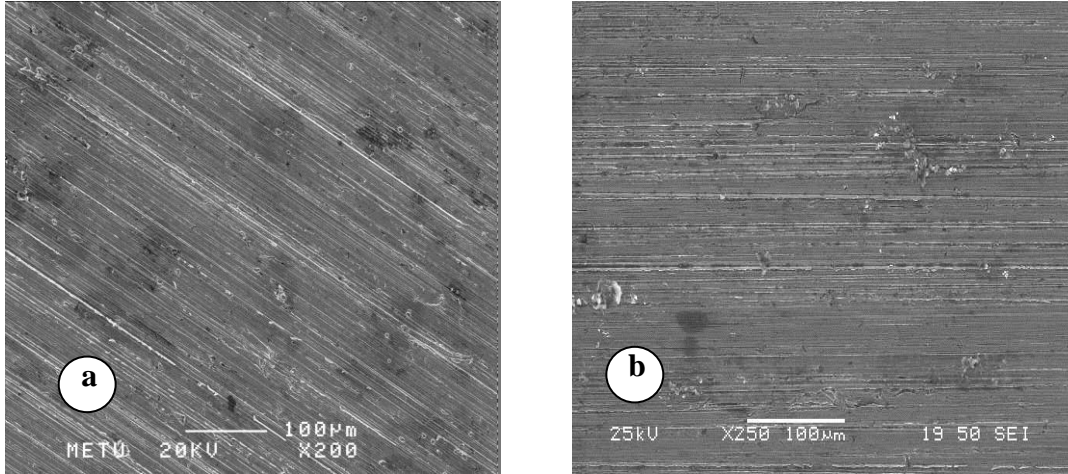
Şekil 7.47. İşlemsiz AISI 8640 çeliğinin 1000 a) ve 1200 b) mesh Al_2O_3 zımparada 20 N yük altında aşınmış yüzeylerin SEM görüntüsü.



Şekil 7.48. 850 °C 2 saat borlanmış AISI 8640 çeliğinin 1000 a) ve 1200 b) mesh Al_2O_3 zımparada 20N yük altında aşınmış yüzeylerin SEM görüntüsü.

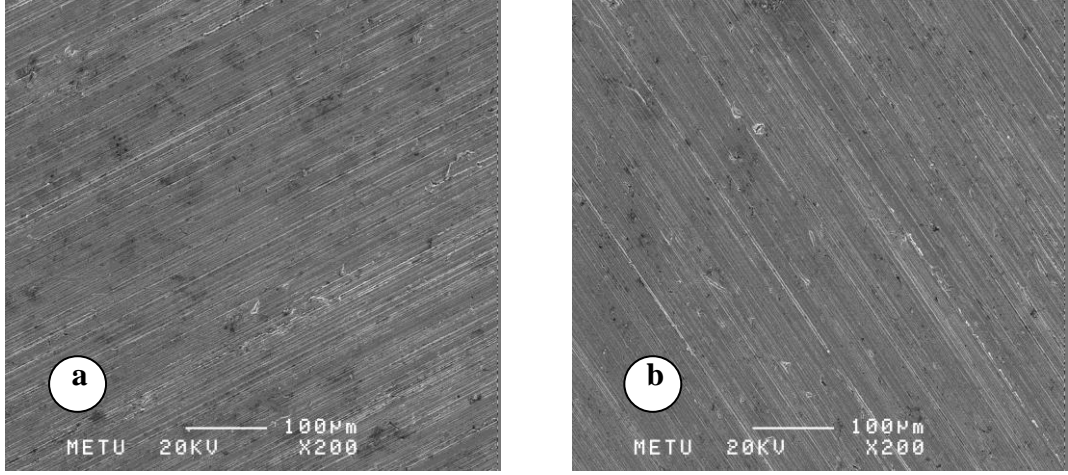


Şekil 7.49. 850 °C 8 saat borlanmış AISI 8640 çeliğinin 1000 a) ve 1200 b) mesh Al_2O_3 zımparada 20N yük altında aşınmış yüzeylerin SEM görüntüsü.

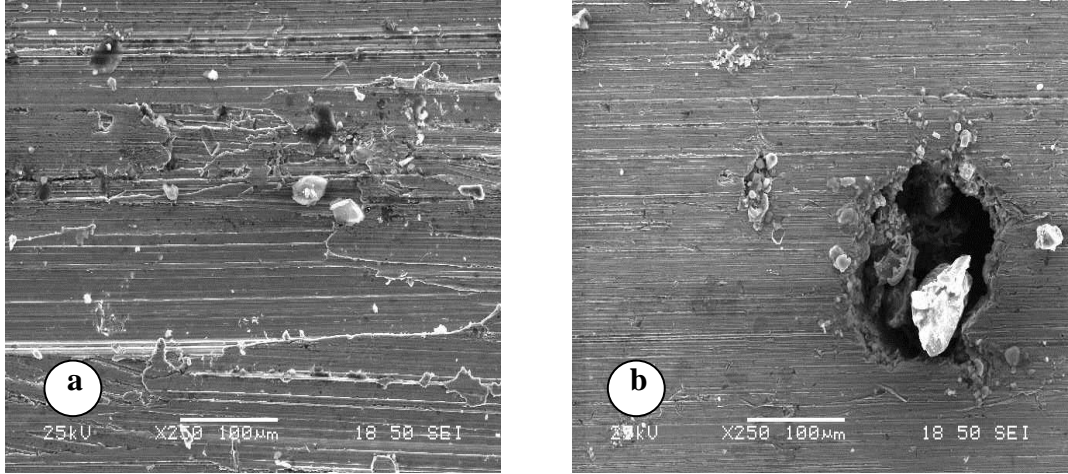


Şekil7.50. 950 °C 2 saat borlanmış AISI 8640 çeliğinin 1000 a) ve 1200 b) mesh Al_2O_3 zımparada 20N yük altında aşınmış yüzeylerin SEM görüntüsü.

Borlanmamış AISI 8640 çeliğinin ve GS 60 çeliğinin 20 N yükler altında aşınmış yüzey görüntüleri incelendiğinde, zımpara boyutunun büyümesi ile kanallarda daha büyük, geniş ve derin olmuştur. Görüntüler incelendiğinde, zımpara boyutunun artmasına paralel olarak kopmaların ve kırılmaların da daha fazla olduğu görülmektedir (Şekil 7.47 ve Şekil 7.52).



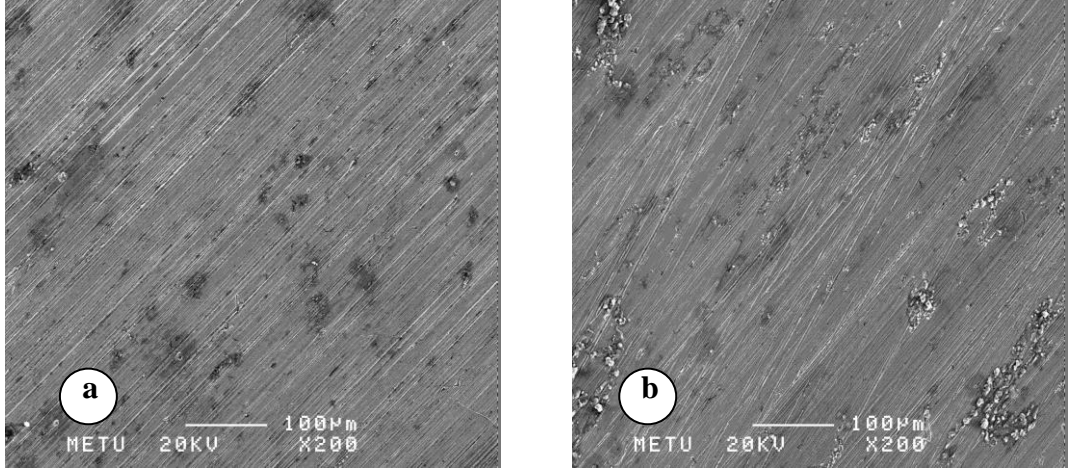
Şekil 7.51. 950 °C 8 saat borlanmış AISI 8640 çeliğinin 1000 a) ve 1200 b) mesh Al_2O_3 zımparada 20N yük altında aşınmış yüzeylerin SEM görüntüsü.



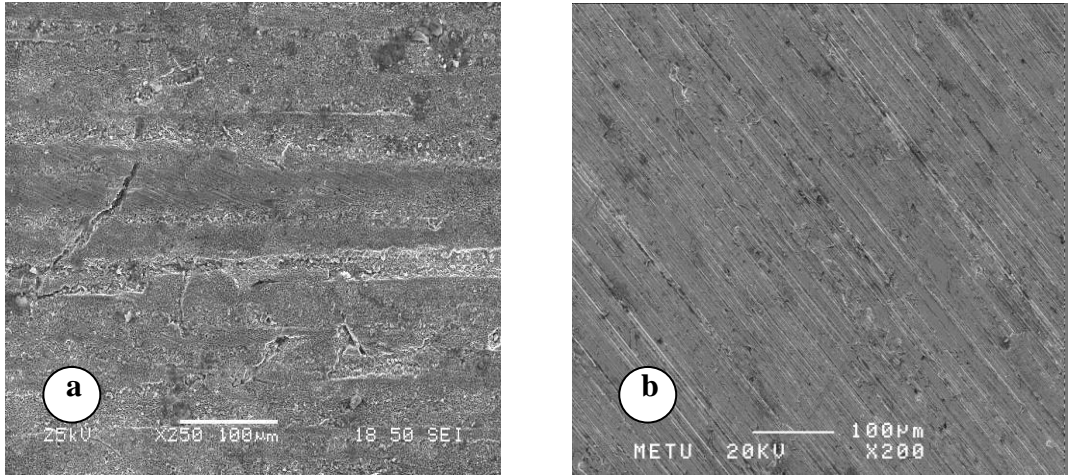
Şekil7.52. İşlemsiz GS 60 çeliğinin 1000 a) ve 1200 b) mesh Al_2O_3 zımparada 20N yük altında aşınmış yüzeylerin SEM görüntüsü.

Aşındırılmış yüzeyler incelendiğinde, aşındırıcı tane büyüklüğü arttıkça, düzgün olmayan pürüzlü ve derin yivlerin meydana geldiği görülmektedir. Aynı sıcaklıkta artan borlama süresi ile aşınma izlerinin daha ince olduğu görülmektedir. 2 ve 8 saatlerde borlanmış 8640 çeliğinin (Şekil 7.48 - 7.51) ve GS 60 çeliğinin (Şekil 7.53 - 7.56) aşınmış yüzey görüntüleri incelendiğinde, aynı sıcaklıkta artan borlama zamanı ile aşınma direncinin arttığı aşınma kanallarının 8 saat borlanmış numunelerde daha ince ve küçük olduğundan anlaşılmaktadır. Borlama sıcaklığının artmasıyla da aşınma direnci arttığı aşınma kanallarının 950 °C'de borlanmış numunelerde daha ince ve küçük olduğundan anlaşılmaktadır. Bunun düşük

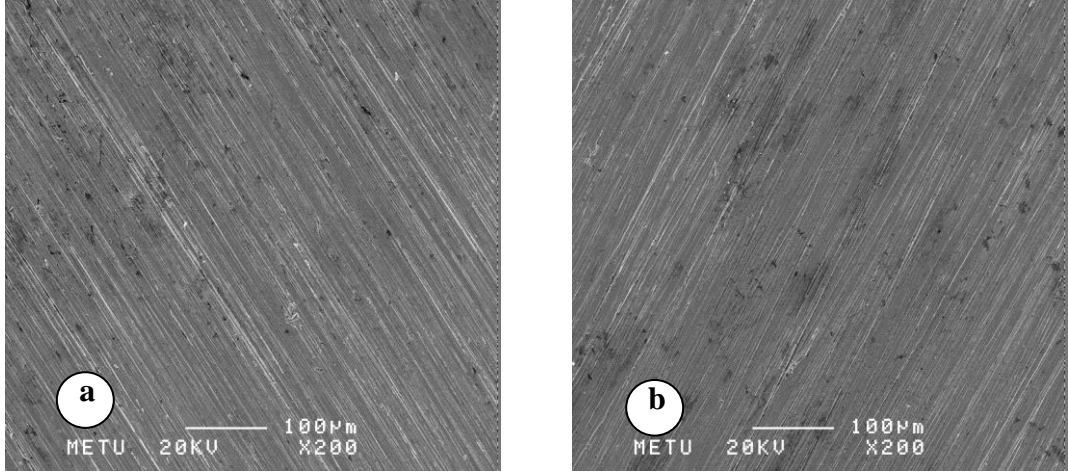
sıcaklıklardaki borkatman kalınlığının daha az olmasından kaynaklandığı söylenebilir.



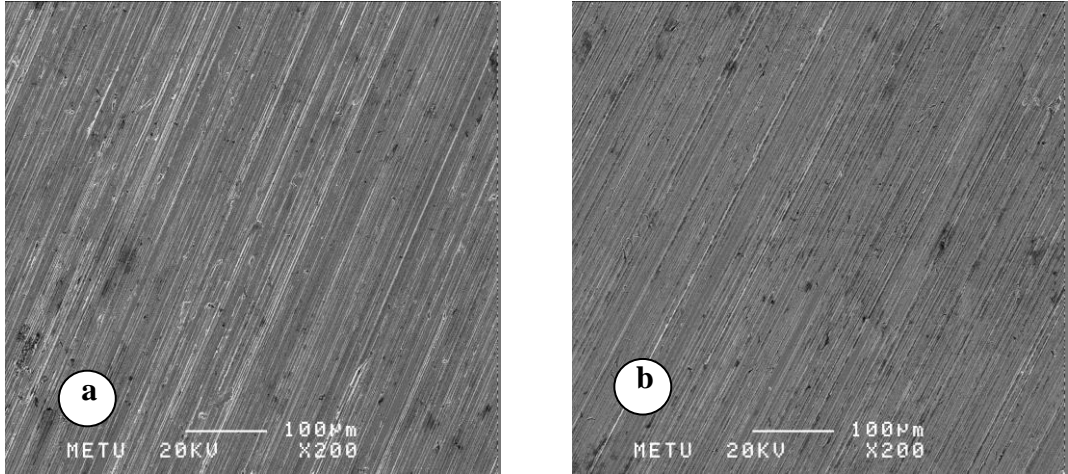
Şekil7.53. 850 °C 2 saat borlanmış GS 60 çeliğinin 1000 a) ve 1200 b) mesh Al₂O₃ zımparada 20N yük altında aşınmış yüzeylerin SEM görüntüsü.



Şekil 7.54. 850 °C 8 saat borlanmış GS 60 çeliğinin 1000 a) ve 1200 b) mesh Al₂O₃ zımparada 20N yük altında aşınmış yüzeylerin SEM görüntüsü.



Şekil 7.55. 950 °C 2 saat borlanmış GS 60 çeliğinin 1000 a) ve 1200 b) mesh Al₂O₃ zımparada 20N yük altında aşınmış yüzeylerin SEM görüntüsü.



Şekil 7.56. 950 °C 8 saat borlanmış GS 60 çeliğinin 1000 a) ve 1200 b) mesh Al₂O₃ zımparada 20N yük altında aşınmış yüzeylerin SEM görüntüsü.

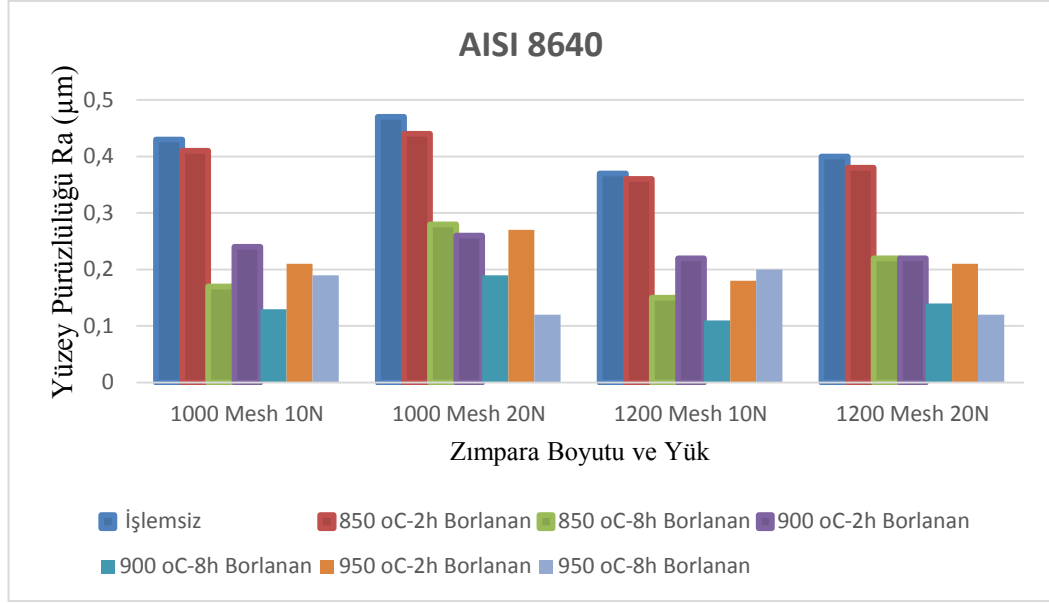
Her iki çeliğin borlanmış numunelerinin aşınmış yüzeyleri karşılaştırıldığında, 850 °C'de 2 saat borlanmış GS 60 çeliğinin aşınma kanallarının daha derin ve geniş olduğu, yüzeydeki kırılma ve deformasyonun fazla olduğu görülmektedir. 950 °C'de 8 saat borlanmış AISI 8640 çeliğinin aşınmış yüzeyleri en ince ve küçüktür. En iyi aşınma direncini 950 °C'de 8 saat borlanmış AISI 8640 çeliği göstermiştir. Aşınma şekillerinden de anlaşılacağı gibi malzemelerin sertlik değerleri de değiştiğinden aşınma izlerine bakılarak yumuşak malzemelerde beklenildiği gibi aşınmanın fazla olduğu anlaşılmaktadır.

7.5. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ

Aşınmaya etkileyen parametrelerden olan yüzey pürüzlülük değerleri Çizelge 7.3 ve Çizelge 7.4’de verilmiştir. AISI 8640 çelik ve GS 60 çelik malzemelerin aşınmış yüzeylerin pürüzlülük değerleri incelendiğinde abrasif zımpara tane boyutunun artmasıyla (1000 mesh’den 1200 mesh’e) pürüzlülüğün, daha az olduğu tespit edilmiştir (Çizelge7.3 - 7.4 ve Şekil 7.57 - Şekil 7.58). Yükün artmasıyla aşınmış yüzeylerin pürüzlülüğü de artmıştır. 950 °C’de borlanan numunelerin yüzey pürüzlülüğü diğer numunelere göre daha azdır.

Çizelge 7.3. AISI 8640 çeliğin, aşınmış yüzeylerin yüzey pürüzlülük değerleri Ra (μm).

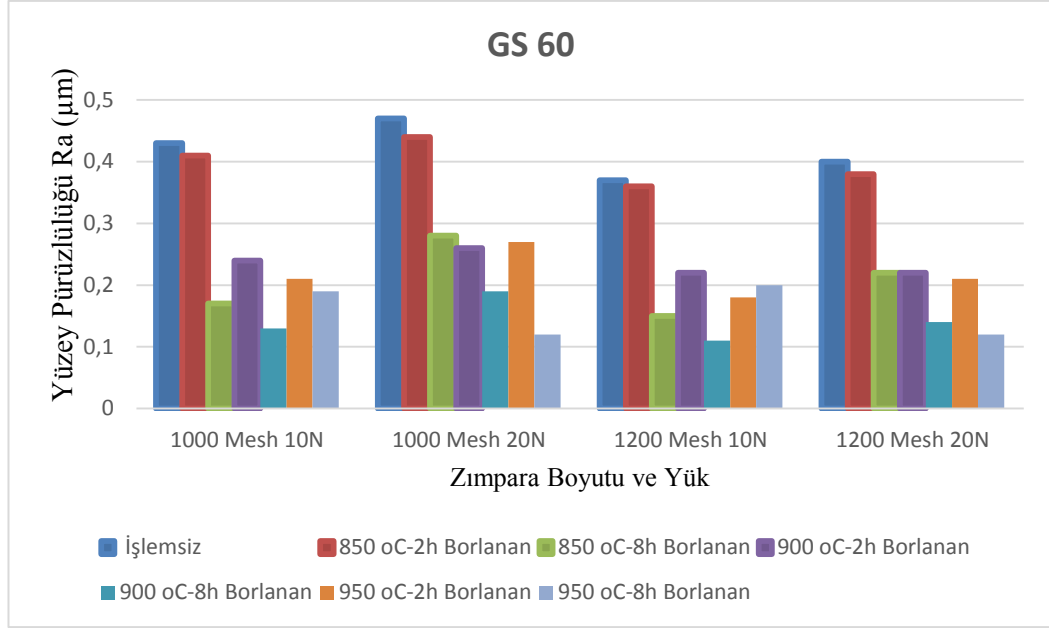
	1000 Mesh		1200 Mesh	
	10 N	20 N	10 N	20 N
AISI 8640				
İşlemsiz	0,56	0,63	0,53	0,61
850 °C-2h Borlanan	0,47	0,52	0,44	0,47
850 °C-8h Borlanan	0,26	0,25	0,18	0,21
900 °C-2h Borlanan	0,41	0,47	0,34	0,37
900 °C-8h Borlanan	0,21	0,24	0,17	0,2
950 °C-2h Borlanan	0,38	0,4	0,36	0,37
950 °C-8h Borlanan	0,21	0,22	0,19	0,2



Şekil 7.57. AISI 8640 çeliğin, aşınmış yüzeylerin yüzey pürüzlülüğü Ra (μm)

Çizelge 7.4. GS 60 çeliğin, aşınmış yüzeylerin yüzey pürüzlülük değerleri Ra (μm).

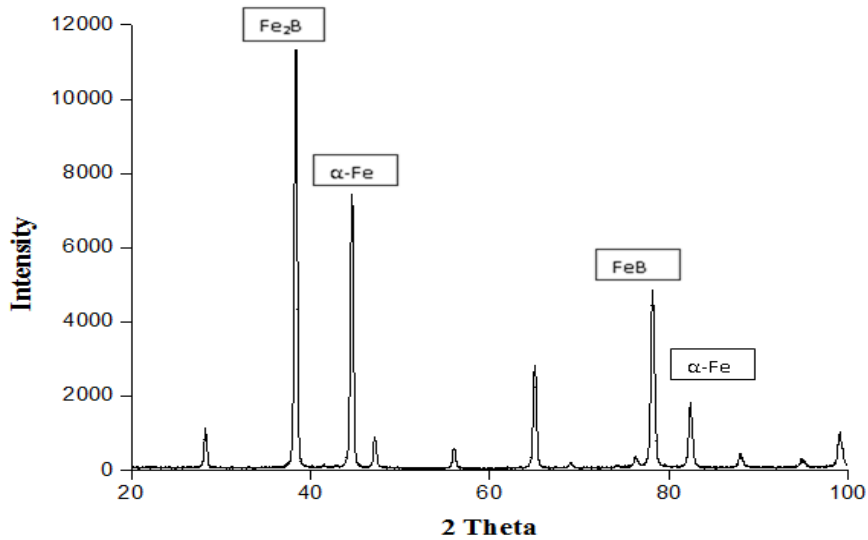
GS 60	1000 Mesh		1200 Mesh	
	10 N	20 N	10 N	20 N
İşlemsiz	0,43	0,47	0,37	0,4
850 °C-2h Borlanan	0,41	0,44	0,36	0,38
850 °C-8h Borlanan	0,17	0,28	0,15	0,22
900 °C-2h Borlanan	0,24	0,26	0,22	0,22
900 °C-8h Borlanan	0,13	0,19	0,11	0,14
950 °C-2h Borlanan	0,21	0,27	0,18	0,21
950 °C-8h Borlanan	0,19	0,12	0,2	0,12



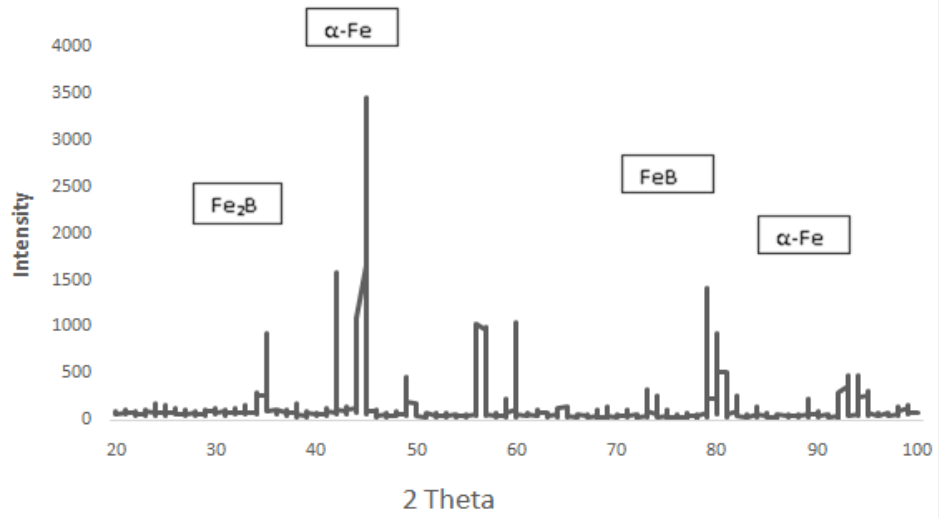
Şekil 7.58. GS 60 çeliğin, aşınmış yüzeylerin yüzey pürüzlülüğü Ra (µm)

7.6. X-IŞINLARI KIRINIM ANALİZİ SONUÇLARI

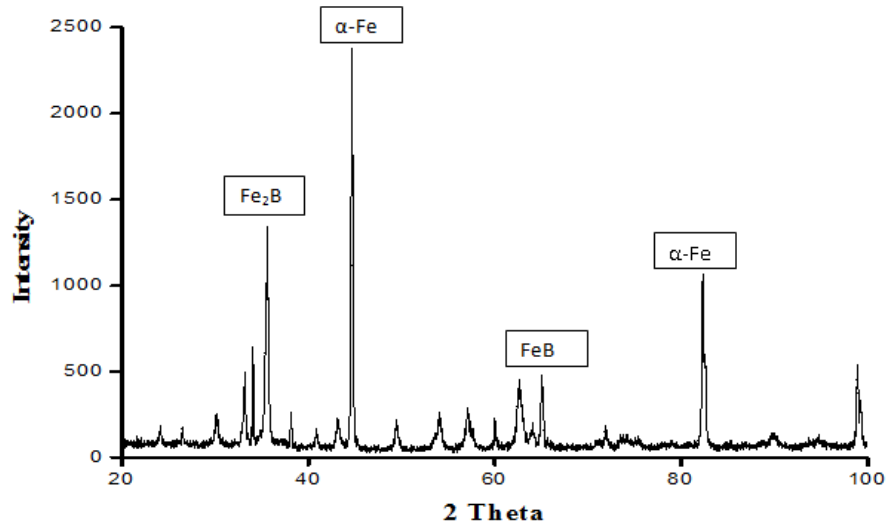
850 °C’de 2 saat ve 950 °C’de 8 saat borlanmış numuneler x-ışını kırınım analizine tabi tutulmuştur (XRD). Borlanmış numunelerin yüzeylerinde oluşan borürler FeB-Fe₂B x-ışını kırınım cihazı ile Şekil 7.59 - 7.60’da ve Şekil 7.61 - 7.62’de görüldüğü gibi teyit edilmiştir.



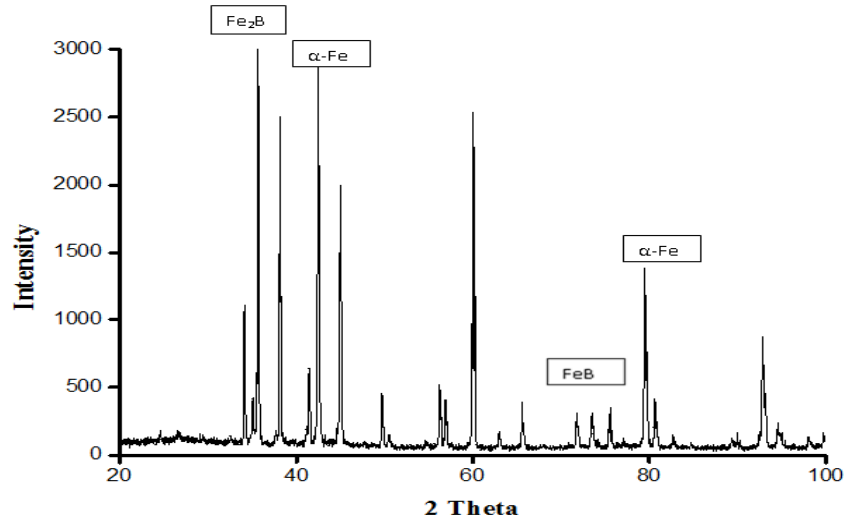
Şekil 7.59. 850 °C’de 2 saat borlanmış AISI 8640 çelik numunenin x-ışını analizi.



Şekil 7.60. 950 °C’de 8 saat borlanmış AISI 8640 çelik numunenin x-ışını analizi.



Şekil 7.61. 850 °C’de 2 saat borlanmış GS 60 çelik numunenin x-ışını analizi.



Şekil 7.62. 950 °C’de 8 saat borlanmış GS 60 çelik numunenin x-ışını analizi.

Şekil 7.59 - Şekil 7.62’de görüldüğü gibi yüzeyde α -Fe, FeB, Fe₂B fazlarına rastlanmıştır. Fe₃B fazına rastlanmamıştır. Demir-Bor denge diyagramında önce Fe₃B fazının oluştuğu, daha sonra Fe₂B fazının ve en son olarak FeB fazının oluştuğu bilinmektedir.

BÖLÜM 8

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bor mineralleri açısından oldukça önemli bir yere sahip olan ülkemizde, borlama işleminin sadece akademik düzeyde kaldığı, endüstride kullanılmadığı görülmektedir. Gelişmiş ülkelerde ise iş parçalarının kullanım ömürlerini artırmak için borlama işlemi endüstriyel alanda başarıyla uygulanmaktadır. Oysaki sürtünen ve aşınmaya maruz kalan makine elemanlarının yüzey sertleştirilmesinde Borlamanın diğer ısı işlemlere nazaran daha iyi sonuçlar verdiği yapılan akademik çalışmalarda görülmektedir.

Bu çalışmada AISI 8640 ve GS 60 çelikleri katı ortamda borlama tekniği kullanılarak borlanmıştır. Borlama işlemi 850 °C, 900 °C ve 950 °C sıcaklıklarda 2, 4, 6 ve 8 saat sürelerde yapılmıştır. Borlanmış ve borlanmamış numunelerin aşınma davranışları pim-disk test cihazında, aynı koşullarda, farklı yükler altında, farklı aşındırıcılarda ve daima yeni zımpara yüzeyine temas ettirilerek yapılmıştır. Numunelerin mekanik özellikleri, sıcaklık ve süreye bağlı olarak çelik yüzeyi ve matris özellikleri, SEM, optik mikroskop ve x-ışınları kırınım analizi yardımıyla incelenmiştir. Seçilen çeliklerin borlama sonrasında elde edilen yüzey özelliklerinin belirlenmesi işlemin teknolojik bakımdan önemini ortaya koymak açısından büyük önem taşımaktadır. Bu araştırmada elde edilen bulgulara dayanılarak ulaşılan sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

1. Hazırlanan her iki çelik numune üzerinde yapılan optik mikroskop ve SEM incelemeleri sonucunda, borlama işlemine tabi tutulan bütün numunelerde borür tabakası, kaplama-matris ara yüzeyi ve matris açık bir şekilde ortaya çıkmıştır.
2. Metalografik incelemeler sonucunda borlanmış yüzeylerde üç ayırt edilebilir bölge gözlenmiştir. Bunlar;

- 2.1. En dışta demir borürleri (FeB ve Fe₂B) içeren katman,
 - 2.2. Borür katmanının altında kalan ve borun çelik ile katı hal çözültisi yaptığı borürlerden düşük sertliğe sahip olup ana metalden daha yüksek sertlik sergileyen difüzyon bölgesi,
 - 2.3. Bordan etkilenmeyen ana malzeme matrisi şeklindedir.
3. Optik mikroskop görüntüleri incelenmiş, borlanmış çeliklerin yüzeylerindeki borürlerin düzgün dallı bir morfolojiye sahip oldukları görülmüştür. Her iki katman da (FeB, Fe₂B) difüzyon doğrultusunda konumlanmış kolon biçimli kristal yapıya sahiptir.
 4. Bor katmanlarının kalınlığının borlama süresi ve sıcaklığa bağlı olarak arttığı görülmüştür. İşlem süresi ile katman kalınlığı arasında parabolik bir ilişkinin olduğu gözlemlenmiştir. Her iki çelik de borür katmanı açısından karşılaştırıldığında, borlanan GS 60 çeliğinin borür bölgesinin, AISI 8620 çeliğinin borür bölgesinden çok az miktarda daha kalın olduğu tespit edilmiştir.
 5. Tespit edilen sertlik değerlerinin borür fazlarından oluşan kaplama tabakasında en yüksek değerde olduğu, geçiş bölgesinden itibaren sertliğin düştüğü tespit edilmiştir. Her iki çelik de mikro sertlik açısından karşılaştırıldığında borlanan GS 60 çeliğinin borür bölgesinin, AISI 8640 çeliğinin borür bölgesinden fazla sertliğe sahip olduğu tespit edilmiştir. Ancak matris sertliklerine bakıldığında, AISI 8640 çeliğinin matris sertliğinin GS 60 çeliğinin matris sertliğinden fazla olduğu gözlemlenmiştir.
 6. Aşındırıcının boyutunun, uygulanan yükün ve aşınma yolunun aşınma direncini önemli ölçüde etkilediği bir kez daha görülmüştür. Yükün artışı ile birlikte aşınmanın da doğrusal olarak arttığı görülmüştür.
 7. Borlanmış çeliklerin yüzeyinde oluşan borür tabakasının aşınma kaybı, borlama sıcaklığının artmasına bağlı olarak düşüş göstermiştir. Aynı borlama sıcaklığında numunelerin aşınma direnci artan borlama zamanı ile artmıştır.

8. Korozyon deneyleri sonucunda borlanmış numunelerin, borlanmamış numunelere nazaran daha iyi sonuç vermiştir. Bu sonuçlar literatürde elde edilen sonuçlara uygunluk göstermektedir.
9. Aşınma izlerinin optik mikroskop ve SEM görüntüleri incelendiğinde düşük sıcaklıkta ve borlama süresin de borlanan çeliğin aşınmış yüzeylerinde iz boyunca derin çizgiler ve partiküller görülmektedir. Bu derinliklerin artan yüke ve aşındırıcının tane boyutuna göre daha derin ve geniş olduğu görülmüştür. Derin çizgiler ve partiküller artan sıcaklık ve borlama süresiyle borlanmış numunelerde çok daha incedir ve aşınma yüzeyleri daha düzgündür. Yüzey pürüzlülük ölçümleri de bunu doğrulamaktadır.
10. X-ışını kırınım analizleri sonucunda, borlanmış AISI 8640 çeliğinin ve GS 60 çeliğinin borür tabakasında FeB, Fe₂B, türünde borürler oluşmuştur. Yine analiz neticesinden anlaşıldığı üzere FeB fazının sıcaklığın artması ile daha kararlı durumda olduğu görülmüştür. Sıcaklığın artması ile borür tabakasındaki fazların kararlılığı da artmaya başlamıştır.

Ekobor2 içerisine Ferrosilisyum ilavesinin borlama işlemine olumlu ve olumsuz etkileri araştırılabilir.

Borlama sonucu yüzeyde oluşan FeB ve Fe₂B fazlarının korozyon dayanımına etkileri incelenebilir. Farklı farklı asitler kullanılarak korozyon deneyleri gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- 1- Komisyon, Devlet Planlama Teşkilatı Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı. Madencilik özel ihtisas komisyonu raporu, *Endüstriyel hammaddeler alt komisyonu kimya sanayi ham maddeleri 2*, 1-63 Ankara (2001).
- 2- Çınkır, M. M., “Ulusal Maden Varlığımız ve Bor Gerçeği.” *Ankara Ticaret Odası Yayınları*, Ankara, 196-204 (2001).
- 3- İnternet: Türk Kimya Sanayisinin Mühendislik ve Bilgi Kaynağı, “Bor ve Bor Ürünlerinin Üretimi, Kullanım Alanları”, <http://ekutup.dpt.gov.tr/> (2013).
- 4- Smallwood, C., “Environmental health criteria 204 Boron”, International Programme On Chemical Safety, *World Health Organization*, Geneva, 1-13 (1998).
- 5- Yılmaz, A., “Her derde deva hazinemiz bor”, *TÜBİTAK-Bilim Teknik Dergisi*, Ankara, 414, 38-48 (2002).
- 6- Delikanlı, K., Ulusoy, N. ve Uzun, H. A., “Yüzeyleri borlama ile sertleştirilen Ç1040 çeliğinin abrasif aşınma ve korozyona karşı dayanımı”, *II. Ulusal DemirÇelik Sempozyumu ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, Yayın No: E/2003/336, Zonguldak, 61-66, (2003).
- 7- Barış, M., “Farklı borlama sürelerinin transmisyon çeliğinde abrasif aşınma davranışlarına etkisinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 27-43 (2006).
- 8- Roskill, “The Economics Of Boron”, *Roskill Information Services Ltd.*, London, 6, 7, 149-201 (2006).
- 9- Çalık, A. ve Özsoy, A., “The effect on the SAE 1030 and SAE 1050 steels of thermal cycling boronizing process.” *Proceedings of the 2nd international boron symposium*, Eskişehir, 213-218 (2004).
- 10- İnternet: Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, “Bor”, <http://www.etimaden.gov.tr/d/file/stratejik-plan-2009-2013.pdf> (2013).
- 11- Bayar, G. ve Atilla, A., “Dünyada ve Türkiye’de Bor ve Toryum”, *T.C. Dış Ticaret Müsteşarlığı, Ekonomik Araştırmalar ve Değerlendirme Genel Müdürlüğü*, Ankara, 1-3 (2003).

- 12- T.C. Başbakanlık DPT Müsteşarlığı, “Yedinci beş yıllık kalkınma planı, özel ihtisas komisyonu raporu, bor bileşikleri alt komisyonu raporu”, **Kimya Sanayi Özel İhtisas Komisyonu**, Yayın No: DPT: 2427-ÖİK:485, Ankara, 2-8 (1996).
- 13- Barış, M., “İlgi odağındaki maden Bor” Enerji, Ekonomik Sosyal Araştırmalar, **ESAM-Stratejik Araştırma Dergisi**, 1 (1):49-57 (2007).
- 14- İnternet: Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, “Komisyon, Bor ve kullanım alanları”, <http://www.etimaden.gov.tr/d/file/stratejik-plan-2009-2013.pdf> (2013).
- 15- Meriç, C., Şahin, S., Backir, B. and Köksal, N.S., “Investigation of the boronizing effect on the abrasife wear behaviour in cast irons”, **Materials and Design**, 27: 751-757 (2006).
- 16- Martini, C., Palombarini, G., Poli G. and Prandstraller, D., “Sliding and abrasife wear behaviour of boride coatings”, **Wear**, 256: 608-613 (2004).
- 17- Habig K. H. and Chatterjee, Fischert R., “Wear behaviour of boride layers alloyed steels”, **Tribology International**, August, 209-215 (1981).
- 18- Mann, B. S., “Boronizing of cast martensitic chromium nickel stainless steel and its abrasion and cavitation-erosion behaviour”, **Wear**, 208:125-131 (1997).
- 19- Venkataraman B. and Sundararajan, G., “The high speed sliding wear behaviour of boronied medium carbon steel”, **Surface and Coat. Technol.**, 73:177-184 (1995).
- 20- Çelebi, G., İpek M., Bindal, C. and Ücisik, A. H., “Some mechanical properties of borides formed on AISI 8620 steel”, **Materials Forum**, 29-Published, 456-460 (2005).
- 21- Jain, V. and Sundararajan, G., “Influence of the pack thickness of the boronizing mixture on the boriding of steel”, **Surface and Coat. Technol.**, 149: 21-26 (2002).
- 22- Sorkun, A., “Metaller arası bileşik uygulamaları projesi”, **Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi**, Eskişehir 1-23 (2000).
- 23- Güneş, E, Demirel, Ç., Toprak, G., Ölmez, E. veÇetin, M, “Bortemperlenmiş GGG 50 malzemenin aşınma davranışının incelenmesi”, **V. Demir-Çelik Kongresi Bildiriler Kitabı**, TMMOB Makina Mühendisleri Odası, Zonguldak, 91-96 (2011).
- 24- Özmen T., “Katı ortamda borlanmış DDK 60 dökme demirin borür tabakası büyüme kinetiği ve aşınma özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Eskişehir 12-44 (2007).

- 25- Yazıcı A. M., “Küresel grafitli dökme demirin bortemperlenmesi”, Yüksek Lisans tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon 20-45 (2006).
- 26- Şen, Ş., “Termokimyasal borlama işlemiyle AISI 5140, AISI 4140, ve AISI 4340 çeliklerinin yüzey performanslarının geliştirilmesi”, Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 3-40 (1998).
- 27- Şen, U., “Küresel grafitli dökme demirlerin borlanması ve özellikleri”, Doktora Tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 6-74 (1997).
- 28- Özbek, İ., “Borlama yöntemiyle (AISI M50, AISI M2) yüksek hız çeliklerinin ve W1 çeliğinin yüzey performanslarının geliştirilmesi”, Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 6-54 (2000).
- 29- Sinha, A. K., “Boriding (Boronising)”, *ASM Handbook, J. Heat Treating*, 4:437-447 (1991).
- 30- Akkurt, M., Makine elemanları, Birsen Kitabevi Yayınları, Cilt 2, *İTÜ*, İstanbul (1992).
- 31- Pıgors, O., “Abrasive verschleißverhalten von Stählen bei Gleit- und Wölzbewegungen”, *Schmierungsstechnik* 10, H.9. (1979).
- 32- Grosh, J., Allgemeine Systematik für die Auswahl von Werkstoffen Verschleißbeanspruchter bauteile *VDI* 194, 70-71 (1973).
- 33- Gürleyik, M.Y., “Soğuk deformasyonla aşınma direnci artırılabilir”, *2. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi, ODTÜ*, Ankara, 501-510 (1986).
- 34- İpek, R., “AISI 1020 çeliğinin, yüzey sertleştirme işlemleri uygulanarak AISI 5155 çeliğinin yerine kullanılabilirliğinin deneysel araştırılması”, Doktora tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 227 (1992).
- 35- Odabaş, D., “Kuru sürtünme şartlarında termomekanik faktörlerin AISI 3315 çeliğinin aşınma davranışına olan etkilerin teorik ve deneysel araştırılması”, Doktora tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 227 (1991).
- 36- Gürleyik, M.Y., “Makine mühendisliğinde aşınma olayları” *Mühendis ve Makine*, 27, (323):3-14 (1986).
- 37- Cöcen Ü. , Belevi M. ve Önel K., “ Tane silisyum karbür katkılı alüminyum alaşımı bazlı kompozitlerin aşınma davranışı”, *7. Denizli Malzeme Sempozyumu*, Denizli, 146-156 (1997).
- 38- Çetin, M., “Östemperlenmiş Küresel grafitli dökme demirlerin aşınma davranışlarının geliştirilmesi” Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü* Ankara, 78-110 (2005).

- 39- Odabaş, D. ve Topal, E. S., “100 Cr 6 çeliğinin iki cisimli abrasif aşınma davranışının kuru veya sıvı sürtünme şartlarında deneysel araştırılması”, **Pamukkale Üniversitesi 6. Denizli Malzeme Sempozyumu**, Denizli 396-405 (1995).
- 40- Ulusoy, E., “Bazı toprak işleme alet ve makinelerinde iş organlarının aşınması üzerinde araştırmalar”, **Ege Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Yayınları**, İzmir 390:11 (1981).
- 41- Donald, R. A., “The Science and Engineering of Materials”, Third Edition, PSW Publishing Company, **University of Missouri**, Rolla, 123-126 (1994).
- 42- Ertan, G., “İş Makinelerinde Aşınma Ömrü Kriterlerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul 28-38 (1999).
- 43- Soydan, Y. ve Ulukan, L., “Sürtünme ve Aşınma Direnci Ölçme Yöntemleri”, **8. Uluslar arası Makine Tasarım ve İmalat Kongresi, ODTÜ**, 581-588 (1988).
- 44- Eyre, T. S., “Friction and Wear Control in Industry”, **Surface Engineering**, Vol. 7:143-148 (1991).
- 45- Yılmaz, F., “Sürtünme ve Aşınma”, **9. Uluslar Arası Metalurji ve Malzeme Kongresi**, İstanbul, 229-247 (1997).
- 46- Hutchings, I.M., “Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials”, **Arnold, London**, 273-276 (1992).
- 47- Nıklas, A., Sture, H. and Staffan J., “Friction and Wear Measurement Techniques”, Modern **Tribology Handbook**, Vol.13 (2001).
- 48- P. L. Hurricks, “Some Metallurgical Factor Controlling the Adhesife and Abrasife Wear Resistance of Steels a Review”, **Wear** 26:285–304 (1973),
- 49- Karamış, M.B., “Traktör Hızı ve Pulluk Çalışma Derinliğinin Uç Demiri Aşınma Hızına Etkileri ve Optimizasyonu”, **Tübitak, 2. Ulusal Makine Teorisi Sempozyumu**, ODTÜ, Gaziantep, 668–677 (1986).
- 50- Habıg, K. H., “Verschleiß UND Härte von Werkstoffen” **Hanser – Verlag München – Wien**, 28-34 (1980).
- 51- Karamış, M. B., “Abrasive Aşınma Mekanizmasında Yüzey Basıncının Aşınmaya Etkisi”, **2. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi**, ODTÜ, Ankara 493–500 (1986).
- 52- Yılmaz, T., “İyonitürleme Yoluyla Sertleştirilmiş SAE 4140 Çeliğinin Aşınma Dayanımının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İzmir, 1-39 (1992).

- 53- Gldaş, A. M., ‘‘Aşınma Deneş Aparatının Tasarımı, retimi ve Metal Matrisli Kompozitlerin Aşınma Davranışlarının Deneşsel Olarak İncelenmesi’’, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, 1-47 (1998).
- 54- Berns, H., and Theisen, W., Ferrous Materials: Steel and Cast iron, **Springer-Verlag** Berlin, 1-52 (2008).
- 55- İnternet: ‘‘AISI 8640 elik özellikleri’’,
www.brighthub.com/engineering/mechanical/articles/74546.aspx (2013).
- 56- M.K.E Normu zel Nitelikte elik Türleri Kataloğu, **Makinea Kimya E.N.D Kurumu**, 16-28 (1978).
- 57- Gerengi, H., ‘‘Tafel polarizasyon (tp), lineer polarizasyon (lp), harmonik analiz (ha) ve dinamik elektrokimyasal impedans spektroskopisi (deis) yöntemleriyle düşük karbon eliği (AISI 1026), pirinç ve nikelium-118 alaşımlarının yapay deniz suyunda korozyon davranışları ve pirinç alaşımlarına benzotriazol’un inhibitör etkisinin araştırılması’’, Doktora Tezi, **Eskisehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Eskişehir, 1-30 (2008).
- 58- Konuş, M. T., ‘‘Alüminyum-bakır-silisyum alaşımlarının sulu ortamlardaki korozyonuna lantanitlerin etkisi’’, **Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 3-5 (2005).
- 59- Yakar, E., ‘‘Elektropolimerizasyon yöntemiyle polipirol ve polianilin ile kaplanmış alüminyumun asidik korozyonunun önlenmesinde farklı anyonların etkileri’’, Yüksek Lisans, **Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kocaeli, 14-31 (2006).
- 60- Bilhan, H., ‘‘eşitli organik tükürük komponentlerinin diş hekimliğinde kullanılan farklı döküm alaşımları ve amalgam’ın korozyonu üzerine etkisi’’, Doktora Tezi, **İstanbul Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 25-29 (2003).
- 61- Kkkara, H., ‘‘Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen Al-SiCpkompozitlerin difüzyon kaynak kabiliyetlerinin araştırılması’’, Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 41-44 (2008).
- 62- Görener, A., ‘‘Al-Si matrislikompozit malzemelerin korozyon davranışlarının incelenmesi’’, Yüksek Lisans Tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 51-54 (2007).
- 63- Tabur, M., ‘‘Bor Karbür Kaplanmış AISI 8620 ve HARDOX 400 eliklerinin Abrasif Aşınma Davranışlarının İncelenmesi’’, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstriyel Teknoloji Eğitimi** 1-78 (2008).
- 64- Sen, S., Sen, U., Bindal, C., ‘‘Tribological properties of oxidised boride coatings on AISI 4140 steel’’, **Materials Letters**, 60: 3481-3486, (2006).

- 65- Uslu, I., Comert, H., Ipek, M., Ozdemir, O., Bindal, C., “Evaluation of borides formed on AISI P20 steel”, *Materials and Design*, 28: 55-61, (2007).
- 66- Demirel, Ç., Çetin, M., “Borlanmış AISI 8640 Çeliğinin Abrasif Aşınma Davranışı” *6th International Advanced Technologies Symposium* (IATS’11), Elazığ, 244-248 (2011).
- 67- Demirel, Ç., Çetin, M., “GS 60 Çeliğinin Borlama Özelliklerinin İncelenmesi” *International Iron & Steel Symposium*, Karabük, 269-277 (2010).

ÖZGEÇMİŞ

13.06.1986 tarihinde Çorum'un – Sungurlu ilçesinde doğdu. 1999'da Dr. Sedat Dr. Melahat Baran İlköğretim okulunu, 2004 'de Sungurlu Lisesini bitirdi.

2006 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Döküm Öğretmenliğini kazandı. 2010 yılında birincilikle mezun olduktan sonra yine 2010 yılında Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi anabilim dalında yüksek lisans programını kazandı. Halen Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres :Bahçeli Evler Mah. Şenyurt 1. Cad. Anadolu Apt.. No:4/4 Çorum

Tel : 0 537 245 80 23

E-posta : dem_193@hotmail.com